

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМ В АСУТП КОНДИТЕРСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Тарасюк В.П., Алдохина А.С., Осыко А.Н.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

Кафедра электронной техники

E-mail: [vita@kita.dgtu.donetsk.ua](mailto:vita@kita.dgtu.donetsk.ua)

## **Abstract**

*Tarasyuk V.P., Aldohina A.S., Osyko A.N. Application of theory of the selfgetting organized systems in the automated control systems of pastry production. Development of the automated technological process control systems of preparation of mixtures with a variable quantity and quality of initial ingredients is a thorny problem from point of receipt of the finished good of the set quality. One of ways of decision of problem is forming of mathematical models, containing mathematical description of both percentage correlation of mass stakes of initial raw material in the prepared product and parameters of quality of initial raw material on each other for providing of quality of the finished good.*

**Общая постановка проблемы.** Разработка автоматизированных систем управления технологическими процессами приготовления смесей с переменным количеством и качеством исходных ингредиентов является сложной проблемой с точки зрения получения конечного продукта заданного качества. Одним из путей решения проблемы является формирование математических моделей, содержащих математическое описание как процентного соотношения массовых долей исходного сырья в приготавливаемом продукте, так и взаимовлияние параметров качества исходного сырья для обеспечения качества конечного продукта.

**Анализ публикаций и разработок по теме.** Данная проблема относится к проблеме обобщения и развития теории оптимальных и адаптивных гибридных систем автоматизации ТП, оптимизации систем управления на базе унифицированных алгоритмов и методов интеллектуального дистанционного управления и сбора данных и создания промышленных систем автоматизации, что реализуют эти алгоритмы и обеспечивают снижение уровня влияния окружающей среды и повышения качества конечных продуктов. Эти проблемы отражены в работах В.О.Бунька, К.П.Власова, И.М.Евстигнеева, В.К.Кипи, А.Ф.Кравчука, А.В.Панина, Е.Е.Рафалеса-Ламарки, В.И.Салиги, В.С.Синепольского, В.О.Ульшина, Д.А.Зубова, Н.А.Шмачкова, J.R.Brigtman, T.S.Brown, S.Cierpisz, и др. В работах показано, что одновременно актуальной необходимостью контроля качества готовой продукции существующие локальные АСУТП не отвечают современным требованиям и не обеспечивают эффективного решения сложных заданий в жестких условиях выполнения ТП (многоканальная, нестационарность, возмущенность, нечеткость и неполнота информации наряду с большим значением транспортного запаздывания исходных параметров и др.).

**Постановка задач исследований.** На основе существующей теории самоорганизующихся систем А.Г. Ивахненко [2] рассматривается возможность построения АСУ ТП приготовления пралиновых масс, базирующуюся на прогнозирующих математических моделях сопровождения ТП. Вопрос рассматривается в контексте последующего синтеза адаптивной системы управления производственными процессами кондитерской фабрики на скользящем интервале оптимизации на базе оперативной идентификации параметров.

**Основной материал и результаты работы.** Современные условия функционирования кондитерских фабрик характеризуются многоканальностью, нестационарностью, возмущенностью, нечеткостью, неполнотой информации и значительным транспортным запаздыванием производственной информации, структурно-параметрической нестационарностью объектов управления (ОУ) и другими факторами, усложняющими синтез эффективных систем управления [2]. В этих условиях актуальной является задача разработки новых более эф-

фактивных методов управления технологическими процессами приготовления кондитерских изделий. Предлагается подход, основанный на оперативной идентификации параметров ОУ с последующим синтезом оптимального управления в пространстве состояний [3]. Он включает три основных этапа – идентификация коэффициентов дискретной модели ОУ на основе метода наименьших квадратов [1], вычисление текущих значений переменных пространства состояний и синтез оптимального управления (при исследовании использовалось допущение об известном значении запаздывания, т.е. размерность пространства состояний величина постоянная).

Динамика одномерного ОУ описывается следующей системой разностных уравнений [1]:

$$y^*_{k+g} = \sum_{v=1}^{N_y} a_v y_{k+g-v} + \sum_{v=1}^{N_u} b_v u_{k+g-v} + \sum_{v=0}^{N_H} g_v h_{k+g-v}, \quad (1)$$

где  $y$ ,  $u$ ,  $h$  - выходные величины ( $y^*$  - задание выходной координаты), управляющие и возмущающие воздействия, соответственно;

$a$ ,  $b$ ,  $g$  - весовые коэффициенты (для модели - оцениваемые по методу наименьших квадратов);

$k$  – номер текущего такта управления;

$g$  - номер будущего (рассчитываемого) такта управления относительно текущего  $k$ ,  $g=1, \dots, N$ ;

$N$  – число тактов оптимизации;

$N_y$ ,  $N_u$ ,  $N_H$  – максимальные значения запаздываний по выходным величинам, управлениям и возмущениям соответственно;

$v$  – значение запаздывания по выходной величине, управлению или возмущению.

Начальные условия:

$$y_{k-v} = y_{k-v}^0, \quad v=1, \dots, N_y; \quad (2)$$

$$u_{k-v} = u_{k-v}^0, \quad v=1, \dots, N_u; \quad (3)$$

$$h_{k-v} = h_{k-v}^0, \quad v=0, \dots, N_H. \quad (4)$$

Ограничения на выходные величины и управления объекта (1) (при исследовании ограничение (5) не учитывалось в силу неточности модели реального объекта):

$$y_{min} \leq y_{k+g} \leq y_{max}, \quad g = 1, \mathbf{K}, N; \quad (5)$$

$$u_{min} \leq u_{k+g} \leq u_{max}, \quad g = 1, \mathbf{K}, N. \quad (6)$$

Критерий функционирования системы управления представляется в виде квадратичного функционала качества со скользящим интервалом оптимизации:

$$J = X^T(N)FX(N) + \sum_{g=k+1}^{k+N} [X^T(g)Q(g)X(g) + r(g)u^2(g)], \quad (7)$$

где  $F$ ,  $Q(g)$  - симметричные неотрицательно-определенные матрицы весовых коэффициентов;

$r(g)$  - положительный коэффициент;

$X(N)$  – вектор переменных пространства состояний в конечный момент времени оптимизации.

Анализ динамических характеристик объектов управления кондитерского производства [4,5] показывает, что они с достаточной для практики точностью аппроксимируются апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием (например, дозирование и отстойка представляются апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием, сушка – при нулевой постоянной времени – апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием и

т.д.). Дискретная матричная модель в пространстве состояний с учётом возмущающего воздействия и экстраполятора нулевого порядка имеет следующий вид

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \mathbf{M} \\ x_{d+1}(k+1) \\ x_{d+2}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \mathbf{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{L} & 0 & 0 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{L} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{L} & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \mathbf{M} \\ x_{d+1}(k) \\ x_{d+2}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{M} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k);$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} b_2 & b_1 & 0 & 0 & \mathbf{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \mathbf{M} \\ x_{d+1}(k) \\ x_{d+2}(k) \end{bmatrix} + h(k);$$

$$\text{или } X(k+1) = AX(k) + Bu(k); y(k) = CX(k) + h(k), \quad (8)$$

где  $d$  - дискретное запаздывание: ( $\tau = dT_0$ );

$t$  - временное запаздывание;

$T_0$  - период квантования;

$a_1, a_2, b_1, b_2$  - коэффициенты дискретной передаточной функции приведенной непрерывной части;

$h$  - случайная величина с нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией, представляющая шум наблюдения;

$x_i$  - переменные состояния,  $j=1, \dots, d+2$ .

Для определения переменных состояния в текущий дискретный момент времени  $k$  необходимо составить систему линейных уравнений и итерационный алгоритм для последующего расчёта. В качестве примера рассмотрим один из этапов кондитерского производства технологический процесс приготовления пралиновой смеси. Пралине представляет собой тонко измельченную кондитерскую массу, в состав которой входят: жир, орехи, сахарная пудра и добавки.

Для обеспечения оперативности управления ТП приготовления пралиновых масс и адекватности математической модели управления качеством система управления базируется на принципах получения статических и динамических характеристик непосредственно на объекте в процессе управления [6]. При создании математической модели объекта различают два основных этапа: определение структуры модели, т.е. набора функциональных и позиционных ограничений, качественный вид последних; расчет числовых значений коэффициентов ограничений. Наиболее часто используется подход к построению модели объекта, заключающийся в задании структуры в виде зависимости вектора выходных координат комплекса  $Y$  от вектора его входных координат  $X$ .

Рассмотрим основные положения по формированию структуры статической модели с постоянными относительными выходами для систем смешивания. Имеется система, в которой материальный поток  $X$ , состоящий из компонентов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , перерабатывается (смешивается) в поток  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ . Компоненты продуктов - это смеси из сырьевых компонентов, входящих в рецептуру. Выход продукта  $Y$  есть

$$(a_{11}, \dots, a_{1n}) \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} = (1, \dots, 1) \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Основной задачей получения статических моделей, является отыскание связей между входными величинами  $X$  и выходными  $Y$ , т.е. определения коэффициентов связей (матрицы

$A = |a_i|, i=1, \dots, m$ ). Возникает задача определения структуры и параметров самоорганизующейся модели рассматриваемого процесса [7]. В общем виде она имеет вид

$$Y(\bar{X}) = C_0 + \sum_{i=1}^k C_i f_i(\bar{X}); \quad f_i(\bar{X}) \in F(\bar{X}), \quad (10)$$

при  $k \leq k_0, n \leq n_0, F(C_m - C_i)^2 \rightarrow \min$ ,

где  $f_i(\bar{X})$  – неизвестные функции, формируемые в классе опорных функций  $F(\bar{X})$ ;

$k_0$  – задаваемая длина полинома модели;

$n_0$  – степень полинома;

$C_i$  – неизвестные коэффициенты модели, подлежащие определению;

$\Phi$  – критерий адекватности при отборе модели [7].

В этом случае модель в процессе управления формируется непосредственно на объекте путем задания класса опорных функций, степени и длины полинома. В качестве критерия адекватности используется среднеквадратичное отклонение  $e_p^2$  выходной координаты модели  $Y_t^M$  от координаты частной модели  $Y_t$  в выборке исходных данных  $N$ :

$$e_p^2 = \frac{\sum_{t \in N} (Y_t^M - Y_t)^2}{\sum_{t \in N} Y_t^2} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Этот критерий удобно использовать при самоорганизации моделей в таком режиме, когда модель корректируется при небольшом изменении исходных данных в выборке. Тогда алгоритм самоорганизации должен содержать некоторый источник моделей, в котором хранятся варианты моделей.

Таким образом, при построении системы управления технологическим процессом целесообразно задавать не модель в окончательном виде, а метод получения адекватной модели из опорных функций непосредственно на объекте на обучающей выборке, при этом структура модели зависит от выбора опорных функций, числа аргументов и длины аппроксимирующего полинома. В основе решения этой задачи лежит многопараметрический вычислительный метод анализа многокомпонентных смесей, разработанный Р.Б.Поповым [7]. В ходе решения задачи применялись экспериментально установленные «состав-свойство» данные, полученные при использовании математических методов планирования и анализа эксперимента [8].

Был проведен анализ характеристик качества пралиновой массы. Определено, что пралиновые массы, представляют собой вязкопластичные структурированные дисперсные системы с характерной аномалией вязкости. Анализируя рассматриваемый технологический процесс, видно, что качество готового продукта характеризуется следующими параметрами (рис.1)

$$Z = f(h, j, g, T, l), \quad (12)$$

где  $\eta$  – вязкость готовой смеси, Па·с;  $\phi_1$  – влажность пралиновой смеси, %;  $\gamma$  – дисперсность пралиновой смеси;  $T$  – температура смеси, °С;  $\lambda$  – жирность смеси, %.

На рис. 1 обозначено: СК — смеситель компонентов; ДСП – дозатор сахарной пудры; ДД – дозатор добавок; СД – смеситель добавок; ДО – дозатор орехов; ДЖ – дозатор жира; М – порция готовой пралиновой массы (ПМ). Реологические характеристики ПМ зависят от содержания жира, температуры массы, влажности, влияния механических воздействий, т.е. для получения продукции заданного качества необходимо учитывать:  $\lambda$  – процентное содержание жира;  $\vartheta$  – скорость перемешивания,  $c^{-1}$ ;  $t$  – длительность одного цикла приготовления пралиновой смеси,  $T$  – температуру смеси;  $K$  – оптимальный состав однородной ПМ.

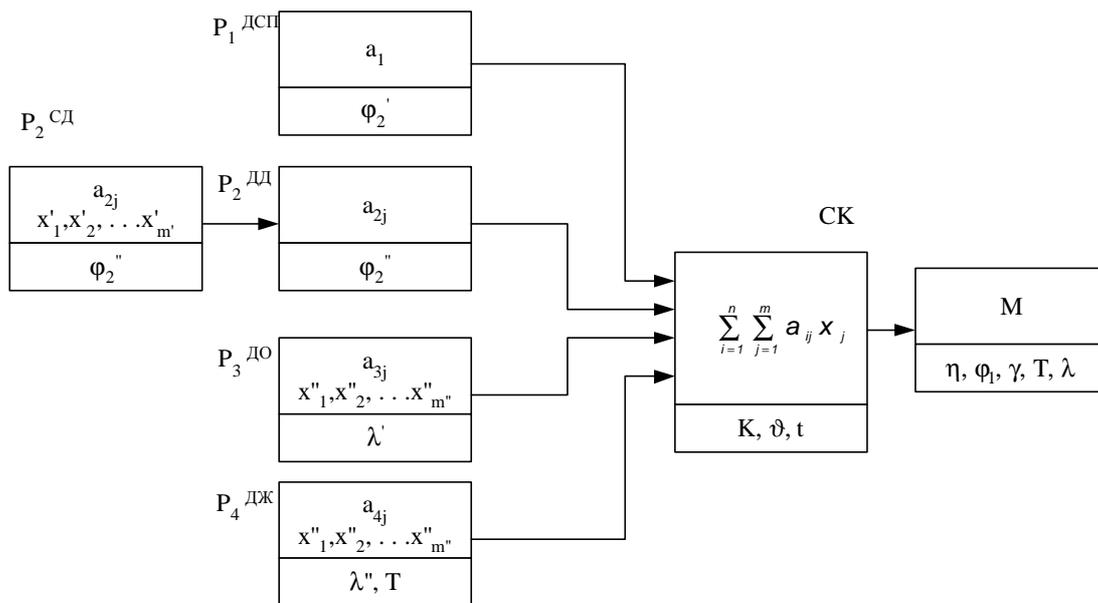


Рис. 1 Схема приготовления пралиновой смеси автоматизированной рецептурной станцией

Если принять, что значения масс компонентов, определенные в режиме реального времени будут соответствовать заданной точности, то качество получения высокооднородной смеси  $K$  будет определяться точностью дозирования массы доз каждого компонента. Задачу получения однородной смеси можно представить в виде целевой функции

$$K = g(P_1, P_2, \dots, P_n), \quad (13)$$

$P_1, P_2, \dots, P_n$  — массовые доли компонентов, входящих в рецептуру пралиновой смеси, по отношению к соответствующему дозатору. Степень достижения этой цели зависит от переменных  $P_i$ , которые позволяют максимизировать функцию  $K$ , как обобщенного показателя качества при соблюдении всех требований технологического процесса, т.е.  $K(P_1, P_2, \dots, P_n) \rightarrow \max$ .

Для оценки зависимости вязкости пралиновой массы от вышеперечисленных факторов были разработаны план однофакторного и многофакторного экспериментов. На основании проведенного регрессионного анализа были получены модели влияния  $\lambda$ ,  $\vartheta$ ,  $T$  на  $\eta$  готовой смеси. Объектом исследования являлось изделие «Белочка», выходной величиной  $Y$  – вязкость смеси, а входными факторами:  $x_1$  – температура;  $x_2$  – процентное содержание жира;  $x_3$  – скорость перемешивания. Задача ставилась следующим образом: определить опорную функцию, степени и длину полинома, т.е. выбрать вид функций отклика в случае однофакторной модели  $Y_1=f(x_1)$ ,  $Y_2=f(x_2)$ ,  $Y_3=f(x_3)$ , и многофакторной  $Y_4=f(x_1, x_2, x_3)$ . После обработки результатов эксперимента были получены следующие результаты: коэффициенты корреляции значительные: для функции  $Y_1$ ,  $r_1 = 0,904$ ; для функции  $Y_2$ ,  $r_2 = 0,846$ ; для функции  $Y_3$ ,  $r_3 = 0,951$ , что подтверждает гипотезу о решающем влиянии вышеперечисленных показателей на качество конечного продукта. Затем при помощи выборочного корреляционного отношения было доказано что входные и выходные величины связаны нелинейной корреляционной связью и полученные в результате исследования регрессионные модели имеют вид:

$$Y_1 = C_0 \cdot e^{C_1 \cdot x_1} + C_2, \quad Y_2 = a_0 \cdot x_2^3 + a_1 \cdot x_2^2 + a_2 \cdot x_2 + a_4, \quad Y_3 = b_0 \cdot x_3^3 + b_1 \cdot x_3^2 + b_2 \cdot x_3 + b_4, \\ Y_4(x_1, x_2, x_3) = d_0 + d_1 \cdot x_1 + d_2 \cdot x_2 + d_3 \cdot x_3 + d_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + d_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + d_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + d_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ + d_4(x_1^2 - a) + d_5(x_2^2 - a) + d_6(x_3^2 - a),$$

где  $a_0 - a_4$ ,  $b_0 - b_4$ ,  $C_0 - C_2$ ,  $d_0 - d_6$ ,  $d_{12}$ ,  $d_{32}$  – коэффициенты, значения которых зависят от вида пралиновой массы. В частном случае, для изделия «Белочка» модели однофакторного эксперимента приняли вид:  $Y_1(x_1) = 102.57 \cdot e^{-0.3 \cdot x_1} + 61.715$ ,

$$Y_2(x_2) = -1.43 \cdot x_2^3 + 37.49 \cdot x_2^2 - 325.39 \cdot x_2 + 1001, Y_3(x_3) = -0.05 \cdot x_3^3 + 3.79 \cdot x_3^2 - 61.01 \cdot x_3 + 356.72,$$

После моделирования расчетных и экспериментальных моделей, были получены зависимости вязкости различных масс от вышеперечисленных параметров.

Кроме того была проанализирована многофакторная регрессионная модель:

$$Y = 2859.36 - 1.259 \times x_1 - 175.66 \times x_2 + 197.17 \times x_3 - 2.0315 \times x_1 \times x_2 - 7.97 \times x_1 \times x_3 - 7.319 \times x_3 \times x_2 + .276 \times x_1 \times x_2 \times x_3 + .900 \times x_1^2 + 3.99 \times x_2^2 + .63 \times x_3^2$$

Были построены поверхности отклика и их проекции на плоскость, с учетом фиксации каждого параметров на трех уровнях: минимальный, средний и максимальный с учетом вариации двух параметров на всем интервале исследования (рис.2).

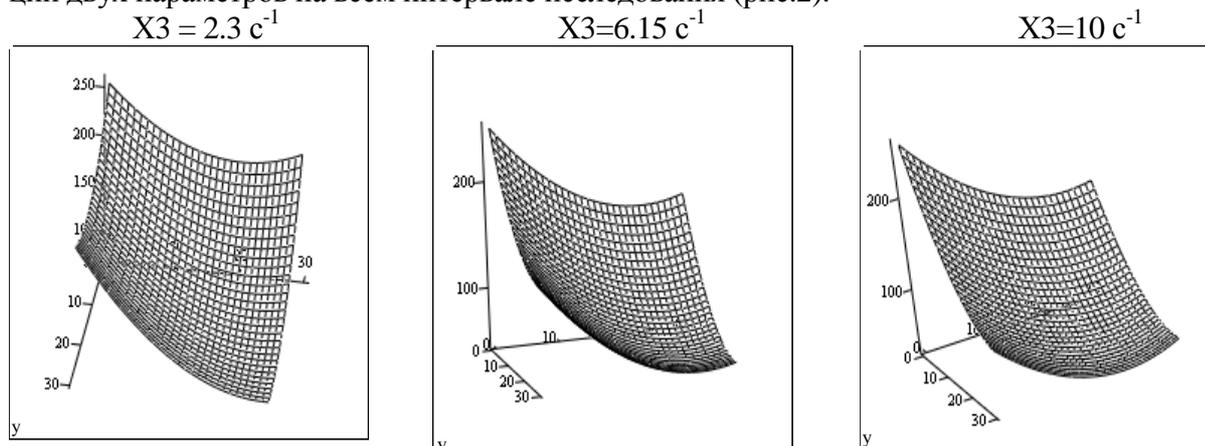


Рис. 2 Некоторые примеры поверхности отклика регрессионных моделей основного показателя качества

Проведенный анализ дал необходимый материал для построения алгоритма принятия решений по выбору вида управляющего воздействия при управлении технологическим процессом приготовления пралиновых масс на основе экспертных оценок. Полученные модели были положены в основу автоматизированного модуля системы управления ТП на основе экспертных оценок текущей ситуации и оценки качества партии готовой смеси.

Лучший результат дает индуктивный метод самоорганизации моделей на ЭВМ, основанный на использовании опытных данных по так называемым внешним критериям. Этот метод моделирования, основанный на принципе самоорганизации, исходит из минимального объема требуемой для моделирования априорной информации. Недостающие сведения машина находит при помощи перебора (последовательной оценки) большого числа вариантов моделей по некоторым внешним критериям. Практически метод является комбинированным: используется достоверная априорная информация об объекте и индуктивный перебор и оценка моделей-претендентов. Оценки находятся по сравнительно небольшой части исходных опытных данных. Остальные данные используются для получения оценок коэффициентов и выяснения оптимальной структуры модели. Применение только метода наименьших квадратов (как показано выше) для оценки коэффициентов модели не является принципиально необходимым и достаточным. Известны алгоритмы, где оценки коэффициентов находятся также, как и структура модели оптимальной сложности, при помощи перебора вариантов дискретных значений. Применение метода наименьших квадратов только уменьшает область перебора моделей.

Из сравнения метода регрессионного анализа и индуктивного метода самоорганизации моделей следует, что в каждом из них используется таблица опытных данных, однако, при регрессионном анализе приходится произвольно назначать структуру модели. Объясняется это тем, что критерий среднеквадратической ошибки, рассчитанной по всем точкам таблицы опытных данных, является внутренним критерием. Любой внутренний критерий

сравнения моделей приводит к ложному правилу: чем сложнее модель - тем она точнее. Сложность модели, например, полиномиальной, оценивается числом и высшей степенью слагаемых. Чем больше членов полинома - тем меньше среднеквадратическая ошибка.

В отличие от метода регрессионного анализа индуктивный метод самоорганизации моделей основан на применении внешних критериев выбора: регулярности, минимума смещения, баланса переменных и комбинированных. Согласно теореме Геделя из математической логики о необходимости внешнего дополнения [7] только внешние критерии позволяют выбрать единственную (для каждого критерия) модель оптимальной сложности.

Есть еще одно существенное отличие регрессионного анализа и метода самоорганизации: регрессионный анализ позволяет строить модели только в области, где число коэффициентов модели равно или меньше числа точек таблицы опытных данных. Многоуровневые алгоритмы самоорганизации позволяют далеко выйти за пределы этой области.

Таким образом, принцип самоорганизации состоит в том, что при постепенном усложнении моделей некоторые критерии (имеющие свойства «внешнего дополнения») проходят через свой минимум. Система управления при помощи перебора моделей находит этот минимум и указывает единственную модель оптимальной сложности.

#### **Выводы.**

- 1) Предложен вариант построения АСУ ТП кондитерского производства на базе теории самоорганизации О.Г.Ивахненко для структурно-параметрической идентификации моделей объектов управления, а также на основе анализа производственных ситуаций и критических моментов с использованием прогнозирующей математической модели идентификации параметров. Предложенный вариант обеспечивает повышение оперативности производства и качества готовой продукции.
- 2) Дальнейшим развитием рассмотренных методов управления предполагается синтез оптимальной адаптивной автоматизированной системы с полной идентификацией объекта управления с использованием аддитивной процедуры усложнения модели на основании алгоритмов, построенных на базе теории самоорганизующихся систем.

#### **Перечень использованных источников**

1. Справочник по типовым программам моделирования/ *А.Г.Ивахненко, Ю.В.Копна, В.С.Степанко и др.; Под.ред. А.Г.Ивахненко.*-К.:Техніка, 1980.-184с.
2. Автоматизация производства на углеобогачительных фабриках/Л.Г.Мулькумов, В.А.Ульшин, М.А.Бастунский и др.-М.:Недра,1983.-295с.
3. Ульшин В.А., Зубов Д.А. Оптимальная дискретная система управления объектами углеобогачительного производства с нестационарными возмущающими воздействиями// Сборник научных трудов НГА Украины №11, том 2. – Днепропетровск: РИК НГА Украины, 2001. – С.26-30.
4. *Тарасюк В.П.* Автоматизированная система управления технологическим процессом приготовления пралиновых масс на основе экспертных оценок / Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. Випуск 88. — Донецьк: ДонНТУ, 2005. — С.56–62. (ВАК) (0,7 п.л.)
5. *Трегуб В.Г.* Автоматизация периодических процессов в пищевой промышленности, – К.: Техника, 1984. – 160 с.
6. *Поспелов Г.С.* Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. – Г.: Наука, 1988. – 280 с.
7. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / *Ивахненко А.Г.* – Киев : Наук. думка, 1981. – 296 с.
8. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. –279 с.