

На правах рукописи

ЖУРАВЕЦ АЛЛА ИГОРЕВНА

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАЛИЧИИ СЛУЧАЙНЫХ СОПУТСТВУЮЩИХ
ФАКТОРОВ**

**Специальность: 05.13.07 - Автоматизация технологических
процессов и производств**

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени кандидата технических
наук.**

ЛНБ ім. В. Стефанівича
АН України

Робота виконана в Севастопольському приборостроительному інституті

Научний керівитель - кандидат технічних наук,

доцент Цуканов А.В.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор Тараненко Віктор Іллічович

- кандидат технічних наук, ведучий научний співробітник

Ряков Ал. Іс. Іллічович

Ведуча організація - І.О по мерикультура і підводним дослідженням Національної академії наук України (г. Севастополь)

Захист состоится " 26 " октября 1994 г. в 17.00

на засіданні спеціалізованого ради Д.ІІ.03.01 при

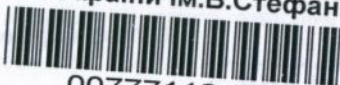
Севастопольському приборостроительному інституті по адресу:

335038, г. Севастополь, Стрелкавья бухта, студгородок.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотека

Севастопольського приборостроительного інститута.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00777112 (P)

Стефаніка
України

1994 г.

Учений секретар спеціалізованого ради

кандидат технічних наук

А.И. Шереметский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При настройке технологических процессов на оптимальный режим работы и создания систем автоматизации управления такими процессами все большее значение приобретают методы экспериментальной идентификации, обеспечивающие решение экстремальных задач оптимизации и прогнозирования в условиях неопределенности структуры модели и ограниченного объема экспериментальных данных. При этом возникает ситуация, когда наряду с управляемыми переменными в модель исследуемого процесса или явления необходимо учитывать переменные, которые исследователь может только измерять, но не управлять. Большинство таких объектов представляет собой сложные уникальные системы, подвергавшиеся постоянному воздействию с чужих сопутствующих факторов. Методы экспериментальной идентификации позволяют находить оптимальные условия протекания технологических процессов непосредственно на объекте без использования аналитических зависимостей показателя качества от управляемых факторов и при неточных измерениях входных величин.

К числу технологических процессов над такими объектами относятся: процессы с неоднородным сырьем в химической технологии, в частности процессы электролитического осаждения защитных покрытий на детали различных механизмов, технологические процессы в сельском хозяйстве, процессы очистки загрязненных вод и т. д.

Задачи идентификации и оптимизации реальных технологических процессов требует разумного распределения экспериментальных зат-

рат, планирования эксперимента и эффективной обработки полученных данных, что позволяет наиболее полно использовать имеющиеся ресурсы и значительно поднять эффективность технологического процесса. В то же время вопросы планирования эксперимента при наличии сопутствующих случайных факторов, так называемого активно-пассивного эксперимента при неизвестной структуре модели объекта, разработаны еще недостаточно. Наличие случайно меняющихся факторов в эксперименте и неопределенность структуры модели требуют своих критериев оптимальности и иной методики планирования эксперимента.

Ц е л ь д и с с е р т а ц и и. Разработка и исследование методики экспериментальной идентификации и оптимизации технологических процессов при наличии случайных сопутствующих факторов и неопределенности структуры модели.

М е т о д ы и с с л е д о в а н и я. Методы теории вероятностей, математической статистики, методы теории матриц и математического моделирования, методы оптимизации технологических процессов в машиностроении, теоретические положения технологии нанесения покрытий.

Н а у ч н а я н о в и з н а.

1) Сформулированы задачи идентификации технологических процессов, характеризующихся наличием случайно изменяющихся факторов, при ограниченном объеме экспериментальных данных и неопределенности структуры модели.

2) Получены аналитические зависимости и исследованы свойства критерия O - оптимальности в среднем качестве плана эксперимента при идентификации и прогнозировании технологического процесса при

наличии случайных сопутствующих факторов.

3) Разработан модифицированный метод случайного поиска, с помощью которого решены задачи сравнительного анализа и построения плана эксперимента при идентификации технологических процессов, которые включают такие зависимости от случайных сопутствующих факторов.

4) Определены условия, при которых для обобщенного критерия качества процесса идентификации в смысле среднеквадратической ошибки прогноза для совокупности моделей из класса, включающего случайные сопутствующие факторы, необходимо строить специальные планы активно-пассивного эксперимента.

П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь . Создана методика идентификации технологических процессов, характеризующихся наличием случайных сопутствующих факторов. Получены условия, при которых необходимо строить специальные планы эксперимента, отличающиеся от существующих. Разработан алгоритм и составлена программа для ЭЕМ на основании модифицированного метода случайного поиска построения специальных планов эксперимента для регрессионных моделей, содержащих сложные зависимости от сопутствующих случайных переменных, распределенных по нормальному закону. Предложенный метод может быть распространен на широкий класс моделей технологических процессов, содержащих зависимости от случайных сопутствующих переменных, законы распределения которых отличны от нормального. Разработана процедура моделирования для селекции моделей из класса, включающего случайные сопутствующие переменные, позволяющая сравнивать и синтезировать новые планы эксперимента.

Реализация результатов работы.

Разработанная в диссертации методика экспериментальной оптимизации и исследования процессов при наличии случайных сопутствующих факторов была использована в гальваническом цехе № 5 Севастопольского судоремонтного завода "Юрыбсудоремонт" при идентификации процесса электролитического нанесения защитного покрытия на детали судовых механизмов.

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертации докладывались на: конференции "Выход молодых ученых и специалистов в ускорение научно - технического прогресса и интенсификацию народного хозяйства" (Севастополь, 1989); Всесоюзной 10 научной конференции "Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях" (Москва, 1992); Всесоюзном семинаре "Инструментальные средства для построения экспертных систем" (Севастополь, 1992); Международном семинаре "Экспериментально - статистическое моделирование и оптимизация в материаловедении" (Одесса, 1993).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано семь работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, содержит 7 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 103 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование выбора темы и приведена общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе дается описание рассматриваемого

класса технологических процессов. При этом все факторы, определяющие состояние процесса, разбиваются на следующие группы: а) факторы, значениями которых можно управлять или задавать по специальному алгоритму; б) факторы, значения которых можно только измерять; в) возмущающие воздействия, которые не поддаются измерению или определению; г) показатель качества работы объекта.

В связи со сложностью исследуемого класса процессов представляется перспективной экспериментальная идентификация моделей процесса и получение оптимальных условий их протекания. В этом случае приходится решать две основные задачи: выбор структуры модели с помощью методов селекции моделей и планирование эксперимента в заданной области значений управляемых переменных, то есть решение о наилучшем по какому-либо критерию расположении экспериментальных точек.

В работе рассматриваются процессы, в которых сопутствующие случайные факторы воздействуют на показатель качества процесса аддитивно по отношению к воздействию управляемых переменных и модель зависимости показателя качества или функции отклика y от вектора управляемых переменных $\tilde{x}^T = [x_1, x_2, \dots, x_v]$ и вектора сопутствующих случайных факторов $\tilde{z}^T = [z_1, z_2, \dots, z_1]$ может быть представлена в виде:

$$y = \tilde{f}^T(\tilde{x}) \tilde{p} + \tilde{\varphi}^T(\tilde{z}) \tilde{q} + \epsilon, \quad (1)$$

где $\tilde{f}^T(\tilde{x}) = [f_1(\tilde{x}), f_2(\tilde{x}), \dots, f_k(\tilde{x})]$,
 $\tilde{\varphi}^T(\tilde{z}) = [\varphi_1(\tilde{z}), \varphi_2(\tilde{z}), \dots, \varphi_m(\tilde{z})]$, \tilde{p} и \tilde{q} - неизвестные параметры модели, ϵ - случайная ошибка, возникающая за счет ошибок измерения.

В этом случае вектор средних случайных переменных \tilde{z} может

зависеть от вектора управляемых переменных \tilde{x} . В работе рассматривается случай, когда эта зависимость линейная, то есть можно записать:

$$\tilde{z} = \tilde{f}^T(\tilde{x}) L + \tilde{e}, \quad (2)$$

$L [k, l]$ - матрица линейной связи; \tilde{e} - вектор остатков, распределенный по нормальному закону с нулевым вектором средних и известной ковариационной матрицей Σ_e .

При оптимизации и прогнозировании процессов, описываемых моделью (1), когда вектор управляемых переменных \tilde{x} фиксирован, показатель качества y продолжает меняться случайным образом за счет изменения сопутствующих случайных переменных z . В этом случае задача оптимизации состоит в поиске и поддержании таких значений вектора \tilde{x} , при которых среднее значение показателя качества принимает экстремальное значение, а задача прогноза состоит в предсказании среднего значения показателя качества.

В работе в качестве примеров технологических процессов с сопутствующими случайными факторами приводятся: а) описание процесса сжигания твердых бытовых отходов; б) описание процесса электролитического нанесения защитного покрытия на детали судовых механизмов; в) описание процесса преобразования солнечной энергии в тепловую.

В первой главе делается также краткий обзор опубликованных работ по планированию активно-пассивного эксперимента, по селекции моделей, синтезу планов эксперимента для селекции моделей.

Во второй главе рассматривается планирование эксперимента для оценки коэффициентов регрессионной модели с сопутствующими случайными переменными, распределенными по нормальному

закону с известными параметрами, для критерия минимизации средне-квadrатической ошибки прогноза.

Рассматривается смешанная регрессионная модель вида:

$$M \{ \tilde{y} : Z \} = F \tilde{p} + Z \tilde{q}, \quad D \{ \tilde{y} : Z \} = W, \quad (3)$$

где, как и ранее, \tilde{y} - вектор измеренных значений функции отклика, F - матрица значений управляемых переменных, Z - матрица измененных значений сопутствующих случайных факторов, W - условная ковариационная матрица вектора \tilde{y} .

Предполагается, что до проведения эксперимента значения матрицы Z неизвестны, а известны только некоторые статистические свойства случайного вектора \tilde{z} . В частности, вектор \tilde{z} может быть распределен по нормальному закону с математическим ожиданием $M \{ \tilde{z} \} = \mu_z$ и матрицей ковариаций Σ_z .

Предполагается, что модель объекта неизвестна и задается класс функций, в которых будет выбираться модель.

Для оценивания неизвестных параметров рассматривается класс вложенных регрессионных моделей, описываемых следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} y_i &= \tilde{f}_i^T(\tilde{x}) \tilde{p}_i, \quad (i=1, \dots, k) \\ y_{k+j} &= \tilde{f}_k^T(\tilde{x}) \tilde{p}_k + \tilde{z}_j^T \tilde{q}_j, \quad (j=1, \dots, l). \end{aligned} \quad (4)$$

Без потери общности можно считать, что $W = \sigma^2 I_n$, тогда дисперсионная матрица оценки вектора коэффициентов модели (3) есть

$$D \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \mid Z \right\} = \begin{bmatrix} F^T F & F^T Z \\ Z^T F & Z^T Z \end{bmatrix}^{-1} \sigma^2 = H \sigma^2$$

Матрица H является случайной матрицей, зависящей от распределения случайной матрицы Z_j и от матрицы P_k .

Для рассматриваемой модели критерий оптимальности эксперимента - среднеквадратическая ошибка прогноза является функционалом от ковариационной матрицы оценок коэффициентов и является случайной величиной.

Планы, минимизирующие среднее значение среднеквадратической ошибки прогноза, в работе называются Q - оптимальными в среднем.

При неопределенности структуры модели процесса для оценки неизвестных параметров используется одна модель из класса (4).

Если в модель включаются не все переменные вектора \tilde{z} , а только часть, которая обозначена через вектор \tilde{z}_j и методом наименьших квадратов оцениваются параметры модели, тогда:

$$M(\tilde{y}) = P_k \tilde{p}_k + Z_j \tilde{q}_j, \quad (5)$$

Z_j - часть матрицы, соответствующая вектору \tilde{z}_j .

$Z = [Z_j | Z_{1-j}]$, Σ_{jj} - часть матрицы Σ , соответствующая вектору \tilde{z}_j , $\Sigma_{\xi} = \Sigma_{(1-j)(1-j)} - \Sigma_{j(1-j)} \Sigma_{jj}^{-1} \Sigma_{(1-j)j}$, то имеет место следующая теорема.

Теорема I.

Пусть существуют матрицы H и Σ_{jj}^{-1} , число опытов $n > k + j + 1$, для оценивания вектора $\tilde{\theta}^T = [\tilde{p}^T \tilde{q}^T]$ методом наименьших квадратов используется модель (5), имеет место зависимость (2) и \tilde{x} - вектор значений управляемых переменных в точке прогноза, тогда справедливо следующее соотношение:

$$EQ_{k+j} = M \{ (\hat{y}(\tilde{x}_*) - y(\tilde{x}_*))^2 \} =$$

$$= (\tilde{q}_{1-j}^T \Sigma_{\xi} \tilde{q}_{1-j} + \sigma^2) \tilde{f}_k^T(\tilde{x}_*) [P_k^{TP} P_k]^{-1} \tilde{f}_k(\tilde{x}_*) \frac{(n-k-1)}{(n-k-j-1)} +$$

$$+ \tilde{q}^T \Sigma_{\epsilon} \tilde{q} + \sigma^2 \quad (6)$$

Интегрированный критерий Q - оптимальности в среднем по области прогноза ω_1 для моделей $(k+j)$ будет иметь следующий вид:

$$EQ_{k+j} = (\tilde{q}_{1-j}^T \Sigma_{\xi} \tilde{q}_{1-j} + \sigma^2) \frac{(n-k-1)}{(n-k-j-1)} \int_{\omega_1} \tilde{f}_k^T(\tilde{x}_*) [P_k^{TP} P_k]^{-1} \tilde{f}_k(\tilde{x}_*) d\tilde{x}_* / \int_{\omega_1} \omega \tilde{x}_* +$$

$$+ \tilde{q}^T \Sigma_{\epsilon} \tilde{q} + \sigma^2 \quad (7)$$

Из теоремы 1 следует, что планы Q - оптимальные в среднем для подкласса $(k+j)$ будут совпадать с обычными Q - оптимальными планами.

Если в модель включаются не все переменные вектора \tilde{x} , а только часть, которую мы обозначим через вектор \tilde{x}_1 и методом наименьших квадратов оцениваются параметры модели:

$$M \{ \tilde{y} \} = F_1 \tilde{p}_1 \quad (8)$$

то имеет место следующая теорема.

Теорема 2.

Пусть существует матрица $[F_1^T F_1]^{-1}$, число опытов $n > 1 + 1$, для оценивания вектора \tilde{p}_1 методом наименьших квадратов используется модель (8), имеет место зависимость (2) и \tilde{x}_* - вектор значений управляемых переменных в точке прогноза, тогда справедливо следующее соотношение:

$$\begin{aligned}
 EQ_1 &= M \{ (\hat{y}(\tilde{x}_*) - y(\tilde{x}_*))^2 \} = \\
 &= (\tilde{q}^T \Sigma_e \tilde{q} + \sigma^2) \tilde{f}_1^T(\tilde{x}_*) [F_1^T F_1]^{-1} \tilde{f}_1(\tilde{x}_*) + \\
 &+ (\tilde{P}_{k-1}^T + \tilde{q}^T L_{k-1}) (\tilde{f}_{k-1}(\tilde{x}_*) - F_{k-1}^T F_1 [F_1^T F_1]^{-1} \tilde{f}_1(\tilde{x}_*)) + \\
 &+ (\tilde{f}_{k-1}^T(\tilde{x}_*) - \tilde{f}_1^T(\tilde{x}_*) [F_1^T F_1]^{-1} F_{k-1}^T) (\tilde{P}_{k-1} + L_{k-1} \tilde{q}) + \\
 &+ \tilde{q}^T \Sigma_e \tilde{q} + \sigma^2 \quad (10)
 \end{aligned}$$

Интегрированный критерий Q оптимальности в среднем по области пространства ω_1 для моделей $(k+j)$ будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 EQ_1 &= (\tilde{q}^T \Sigma_e \tilde{q} + \sigma^2) \int_{\omega_1} \tilde{f}_1^T(\tilde{x}_*) [F_1^T F_1]^{-1} \tilde{f}_1(\tilde{x}_*) d\tilde{x}_* / \int_{\omega_1} d\tilde{x}_* + \\
 &+ \int_{\omega_1} (\tilde{P}_{k-1}^T + L_{k-1} \tilde{q}) (\tilde{f}_{k-1}(\tilde{x}_*) - F_{k-1}^T F_1 [F_1^T F_1]^{-1} \tilde{f}_1(\tilde{x}_*))^2 d\tilde{x}_* / \int_{\omega_1} d\tilde{x}_* + \\
 &+ \tilde{q}^T \Sigma_e \tilde{q} + \sigma^2 \quad (11)
 \end{aligned}$$

Из теоремы 2 следует, что для моделей подкласса 1 планы Q оптимальные в среднем будут совпадать с обычными Q - оптимальными планами.

Если истинная модель технологического процесса описывается общей функциональной зависимостью (1), которая может включать взаимодействия между сопутствующими переменными, тогда усредненная среднеквадратическая ошибка прогноза является функцией, зависящей от плана эксперимента, вектора неизвестных параметров $\tilde{\theta}$, функции φ , матрицы ковариаций $\tilde{\Sigma}_e$ и также дисперсии ошибки σ^2 .

Для нахождения оценки неизвестных параметров $\tilde{\theta}$ используется метод наименьших квадратов:

$$\Phi^A = \begin{bmatrix} \Phi^T \Phi \\ \Phi^T Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^T F & F^T \Phi \\ \Phi^T F & \Phi^T \Phi \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F^T Y \\ \Phi^T Y \end{bmatrix} \quad (13)$$

где F (n, k) - матрица значений вектора \tilde{x} переменных в n опытах, Φ (n, v) - матрица значений вектора $\tilde{\phi}$ в тех же n опытах.

Матрица H является случайной матрицей, зависящей как от плана эксперимента, так и от распределения случайной функции Φ . Так как структура Φ включает различные взаимодействия между случайными сопутствующими факторами, анализ величины Φ^A будет слишком сложен. В результате этого аналитическое решение функционала (13) даже для простейших моделей со взаимодействиями практически неразрешимая задача.

В работе для сравнения планов эксперимента по критерию среднеквадратической ошибки прогноза используется принцип минимакса, то есть исследуется следующий функционал:

$$R(\tilde{\theta}, \Sigma_{\tilde{\theta}}, \sigma^2) = \min_D \max_{\tilde{\theta}} E Q(\tilde{\theta}) \quad (14)$$

Построение оптимальных планов для задач такого рода связано с применением специальных поисковых алгоритмов. Одним из таких алгоритмов является метод случайного поиска. Предлагается использовать методы имитационного моделирования для нахождения функционала (14) на каждом шаге итерационной процедуры.

Среднее значение функционала (14), полученное с помощью

метода Монте Карло должно приближаться к своему истинному математическому ожиданию, для того, чтобы определить влияние отклонений от плана эксперимента на среднеквадратическую ошибку прогноза. Это возможно лишь при очень большом числе итераций в методе Монте-Карло. К тому же построенный таким образом план может отличаться от оптимального. В работе предлагается ограничить количество итераций в методе Монте-Карло; в сравнения двух планов за счет использования одних и тех же последовательностей для \tilde{z} и ε на каждом шаге итерационной процедуры случайного поиска. Тогда среднеквадратическая ошибка прогноза не будет изменяться случайно и сильнее будет зависеть от плана эксперимента.

В третьей главе исследуется обобщенный критерий для селекции прогнозирующих моделей из заданного класса, который можно записать в виде:

$$R = \sum_{i=1}^k v_i E Q_i + \sum_{j=1}^1 v_{k+j} E Q_{k+j} \quad (15)$$

где $v_{i,k+j}$ - вероятность выбора модели i и $(k+j)$ соответственно с помощью критерия селекции. В качестве критерия селекции был выбран критерий C_p - Маллоуса.

Предлагается использовать методы имитационного моделирования для получения вероятностей выбора моделей v_i и v_{k+j} селекционной процедуры.

В работе исследованы вероятности выбора модели из подкласса $(k+j)$ и из подкласса 1. Критерий C_p - Маллоуса для модели $(k+j)$ имеет вид:

$$C_{k+j} = \frac{RSS_{k+j}}{2(k+j)}, \quad (j = 1, 2, \dots, 1)$$

где RSS_{k+j} - остаточная сумма квадратов, $(k+j)$ - количество

оцениваемых параметров модели.

В работе получена формула для распределения остаточной суммы квадратов, связанной с моделью класса (k, j) :

$$RSS_{k+j} \sim \chi^2(n-k-j, (\tilde{q}_{1-j}^T \Sigma_{\tilde{q}} \tilde{q}_{1-j} + \sigma^2)) \quad (j = 1, 2, \dots, l) \quad (16)$$

Откуда следует вывод, что вероятность выбора модели из подкласса $(k+j)$ v_{k+j} не зависит от плана эксперимента.

Критерий С - Маллоуса для модели 1 имеет вид:

$$C_i = RSS_i + 2 \cdot 1, \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

где RSS_i - остаточная сумма квадратов для моделей класса 1, i - количество оцениваемых параметров.

В работе получена формула для распределения остаточной суммы квадратов, связанной с моделью 1:

$$RSS_1 \sim \chi^2(n-k, (\tilde{q}^T \Sigma_{\tilde{q}} \tilde{q} + \sigma^2), \tau^2), \quad (17)$$

где $\tau^2 = \tilde{s}_{k-1}^T F_{k-1}^T A_1 F_{k-1} \tilde{s}_{k-1}$ - параметр нецентральности,

$A_1 = I_n - F_1 (F_1^T F_1)^{-1} F_1^T$ - идемпотентная матрица,

$\tilde{s}_{k-1} = (\tilde{p}_{k-1} + I_{k-1} \tilde{q})$.

Откуда следует, что вероятность выбора 1-ой модели зависит от плана эксперимента и для всей процедуры моделирования необходимо строить специальные планы экспериментов.

В четвертой главе приводятся примеры экспериментов по исследованию технологического процесса электролитического нанесения защитного покрытия на детали судовых механизмов, в частности, нанесения свинцово-оловянно-медного покрытия на рабочую поверхность вкладышей подшипников скольжения.

Совокупность факторов, определяющих состояние процесса,

разбита на три группы:

1) Управляемые факторы $\tilde{x} = (x_1, x_2, \dots, x_5)$: задаваемые оператором концентрации (г/л) меди, олова, свинца, борфторводородной и борной кислот.

2) Сопутствующие случайные факторы $\tilde{z} = (z_1, z_2, \dots, z_5)$: фактические концентрации (г/л): меди, олова, свинца, кислот.

3) Целевая функция: y_1 - процентное содержание меди в осажденном сплаве; y_2 - процентное содержание свинца в осажденном сплаве; y_3 - процентное содержание олова в осажденном сплаве.

Для исследуемого технологического процесса сопутствующие случайные факторы \tilde{z} зависят от управляемых факторов x . В технологических условиях процесса следует наличие линейной зависимости вида:

$$\tilde{z} = \tilde{x} L + \tilde{\sigma}, \quad M(\tilde{z}) = \tilde{x} L, \quad D(\tilde{z}) = \Sigma_{\tilde{\sigma}} \quad (18)$$

Каждый раз изменяя концентрации компонентов электролита, мы на самом деле измеряем значения случайных сопутствующих переменных. Следовательно целевая функция зависит от фактических значений концентраций электролита z . Таким образом, можно предположить наличие линейной по параметрам зависимости вида:

$$\tilde{y} = \Phi \tilde{q} + \tilde{\epsilon}, \quad (19)$$

что является частным случаем функции $\tilde{y} = F \tilde{p} + \Phi \tilde{q} + \epsilon$ при $\tilde{p} = 0$.

В результате дисперсионного анализа, а так же в результате селекции моделей с помощью критерия S_p Маллоуса была получена следующая модель:

$$y = q_0 + z_1 q_1 + z_2 q_2 + z_1 z_2 q_3, \quad (20)$$

где y - целевая функция, то есть процентное содержание меди (y_1) или свинца (y_2) в осаждаемом сплаве; z_1 - концентрация олова в

электролите, z_2 - концентрация свинца в электролите, $q_0 \dots q_3$ - неизвестные параметры модели.

Экспериментально оценивались коэффициенты регрессионной модели методом наименьших квадратов.

Таким образом получены две модели, определяющие процентное содержание меди (y_1) и свинца (y_2) в сплаве. Третья модель, определяющая процентное содержания олова (y_3) в сплаве может быть получена из выражения $y_1 + y_2 + y_3 = 100\%$. Тогда имеет место следующая система уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = -9.2246 + 1.7015 z_1 + 0.1955 z_2 + 0.0299 z_1 z_2 \\ y_2 = 119.6077 - 5.3591 z_1 - 0.7072 z_2 + 0.1115 z_1 z_2 \\ y_3 = 100 - y_1 - y_2 \end{cases} \quad (21)$$

Оптимизация данного процесса состоит в нахождении таких средних значений концентраций свинца и олова в электролите, чтобы выходные величины y_1 , y_2 и y_3 попадали в заданные технической инструкцией нормы процентного содержания соответствующих компонентов. В данном случае выходная величина представляет собой вектор $\vec{y} = [y_1, y_2, y_3]$. В качестве обобщенного критерия оптимальности показателя качества процесса был использован квадрат отклонения случайных величин y_1 , y_2 , y_3 от средних значений заданных интервалов:

$$CR = \sum_{i=1}^3 (\hat{y}_i - y_i^{CP})^2 / w_i^2 \quad (22)$$

где \hat{y}_i - оцененное значение i -ой выходной величины, y_i^{CP} - середина интервала, соответствующего i -ой выходной величине, $w_i^2 = ((y_{max,i} - y_{min,i})/2 + y_{min,i})^2$ - весовая функция i -ой выходной величины, учитывающая различия интервалов варьирования.

Планирование и статистическая обработка результатов экспериментов проведена с помощью методики, разработанной в диссертации. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность использования информации о случайных сопутствующих факторах для идентификации технологического процесса. При этом обобщенный критерий качества процесса позволяет уменьшить число бракованных изделий на 22 % (с вероятностью 0.95) по сравнению с традиционной методикой.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основным результатом работы является разработка методики активно-пассивного эксперимента для идентификации и оптимизации технологических процессов, характеризующихся наличием случайных сопутствующих факторов, и неопределенности структуры модели.

В частности:

1. Проанализированы существующие подходы к планированию эксперимента при идентификации и оптимизации технологических процессов со случайными сопутствующими факторами.
2. Поставлена задача планирования активно-пассивного эксперимента со случайными сопутствующими факторами.
3. Исследованы особенности построения Q - оптимальных в среднем планов, минимизирующих на множестве планов среднеквадратическую ошибку прогноза.
4. Получены аналитические зависимости для средних значений среднеквадратической ошибки прогноза для нормального закона распределения вектора случайных сопутствующих факторов.
5. Предложен модифицированный метод случайного поиска для по-

- строения Q - оптимального в среднем плане эксперимента для модели, включающей взаимодействие случайных сопутствующих факторов.
5. Разработан алгоритм и составлена программа построения такого плана.
 6. Получены условия, при которых для обобщенного критерия качества в смысле среднеквадратической ошибки прогноза для селекции моделей из класса, включающего случайные сопутствующие факторы, необходимо строить специальные планы экспериментов.
 7. Получен новый класс планов экспериментов, минимизирующий обобщенный критерий.
 8. Проведены эксперименты в гальваническом цехе Севастопольского судоремонтного завода, которые показали практическую эффективность предложенной методики.

Полученные результаты могут найти применение также при экспериментальном исследовании других объектов, характеризующихся наличием случайных сопутствующих факторов.

ПУБЛИКАЦИИ

1. A.V. Tsukanov, A.I. Zhuravets. The one method of the experimental design construction for a class of models in the presence of uncontrolled variables, *Advances in modelling & Analysis*, B, vol 27, N 4, 1993, pp. 57-63.
2. A.I. Zhuravets. Structural identification and experimental design for technology process in the presence of uncontrolled variables, *Advances in modelling & Analysis*, C, vol. 42, N 2, 1994, pp. 1-8.

4541311

3. Журавец А.И., Цуканов А.В. Планирование эксперимента при неопределенности структуры модели. - В кн.: Тезисы докладов 10 Всесоюзной конференции "Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях". Москва, 1992, с. 17 - 18.
4. Цуканов А.В., Журавец А.И. Об одном методе построения плана эксперимента для класса моделей в присутствии неконтролируемых переменных. - В кн.: Тезисы докладов Междуарядного семинара "Экспериментальное статистическое моделирование в компьютерном материаловедении". Киев, 1993, с. 28.
5. Цуканов В., Журавец А.И. О выборе плана эксперимента для построения прогнозирующей линейной по параметрам регрессионной модели при наличии сопутствующих случайных переменных. - Деп. в ГНТБ Украины 15.08.94, N 1654 - Ук94., с.20.
6. Журавец А.И. Планирование эксперимента для селекции регрессионных моделей в присутствии сопутствующих случайных переменных. - Деп. в ГНТБ Украины 15.08.94, N 1651 - Ук94, с.12.
7. Журавец А.И. Об одном методе управления технологическим процессом уничтожения бытовых отходов. - Деп. в ГНТБ Украины 15.08.94, N 1653 - Ук94, с. 7.