

СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЖУРАВЕЦ Алла Игоревна

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Специальность: 05.13.07 - Автоматизация технологических  
процессов и производств

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Севастополь - 1996



00778510 (S)

Робота виконана в Севастопольському  
технічному університеті

Научний керівник - кандидат технічних наук,  
доцент Цуканов А.В.

**Офіційні опоненти:**

- доктор технічних наук, професор Тараненко Віктор Анатолійович
- кандидат технічних наук, головний інженер Сало "Ір" Сало Анатолій Афонсьевич

Ведуча організація - НІО по марикультури та підводним дослідженням Національної академії наук України (г. Севастополь)

Захист состоится 16 " февраля 1996 г. в 17.00

на засіданні спеціалізованого комітету при  
Севастопольському державному технічному університеті  
по адресу:

335038, г. Севастополь, Стрелецька бухта, студгородок.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці

Севастопольського державного технічного університету.

Автореферат роз'яснен " 14 " лютого 1996 г.

Учений секретар спеціалізованого комітету

кандидат технічних наук

А.Н. Шереметський

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При настройке технологических процессов на оптимальный режим работы и создании 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 ряду с управляемыми переменными в модель исследуемого процесса или явления необходимо включать переменные, которые исследователь может только измерять, но не управлять. Большинство таких объектов представляет собой сложные уникальные системы, подвергающиеся постоянному воздействию случайных 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 выходных 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 затрат, планирования эксперимента и эффективной обработки полученных данных. Это позволяет наиболее полно использовать имеющиеся ре-

курсы 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 новых критериев оптимальности и иной методики планирования эксперимента.

Т е л е д и с с е р т а ц и и. Повышение качества осаждаемого электрохимическим способом свинцово-оловянно-медного защитного покрытия в системе автоматизированной гальванической линии на базе разработки методов экспериментальной идентификации.

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 автоматизированных технологических процессов, характеризующихся наличием случайно изменяющихся факторов, при ограниченном объеме экспериментальных данных и неопределенности структуры модели.

2) Получены аналитические зависимости и исследованы свойства критерия  $Q$  - оптимальности в среднем качества плана эксперимента при идентификации и прогнозировании автоматизированного технологического процесса при наличии случайных сопутствующих факторов.

3) Разработан модифицированный метод случайного поиска, с

помощью которых решены задачи сравнительного анализа и построения плана эксперимента при идентификации автоматизированных технологических процессов, которые включают сложные зависимости от случайных сопутствующих факторов.

4. Определены условия, при которых для идентификации автоматизированного технологического процесса и селекции модели из класса, включающего случайные сопутствующие факторы, необходимо строить специальные планы активно-пассивного эксперимента.

5) Созданы алгоритмы для автоматизированного статистического контроля и управления технологическим процессом нанесения защитного покрытия на детали судовых механизмов.

**Практическая ценность.** 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 ЭВМ 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.

## Р а л и з а ц и я р е з у л ь т а т о в р а б о т ы .

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

А п р о б а ц и я р е з у л ь т а т о в р а б о т ы . Основные положения диссертации докладывались на: конференции "Вклад 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).

П у б л и к а ц и и . По результатам выполненных исследований опубликовано семь работ.

О б ъ е м р а б о т ы . Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, содержит 9 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 107 наименований.

## О С Н О В Н О Е С О Д Е Р Ж А Н И Е Р А Б О Т ы

о в в е д е н и и дано обоснование выбора темы и приведена общая характеристика диссертационной работы.

В п е р в о й г л а в е ставится задача повышения качества осаждаемого защитного покрытия в АСУП гальванической

обработки деталя. Делается краткий обзор существующих методов повышения качества защиты искривлений, обосновывается применение принципа статистического контроля качества выпускаемой продукции. 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 технологического процесса.

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, а также 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  $\tilde{x}^T = [x_1, x_2, \dots, x_r]$  и вектора сопутствующих случайных факторов  $\tilde{z}^T = [z_1, z_2, \dots, z_1]$  может быть представлена в виде:

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

где  $\tilde{f}^T(\tilde{x}) = [f_1(\tilde{x}), f_2(\tilde{x}), \dots, f_k(\tilde{x})]$ ,

$\tilde{z} = \{\varphi_1(\tilde{x}), \varphi_2(\tilde{x}), \dots, \varphi_r(\tilde{x})\}$ ,  $\tilde{p}$  и  $\tilde{q}$  - неизвестные параметры модели,  $\varepsilon$  - случайная ошибка, возникающая за счет ошибок измерений.

В общем 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 может записываться:

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

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

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

В первой главе дается 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-квадратической 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 измеренных 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  $\Sigma_z$ .

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

Для оценки значения неизвестных параметров рассматривается класс линейных 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 (4) есть

$$D\left\{\begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \vdots \\ \tilde{p}_k \\ \tilde{q}_1 \\ \vdots \\ \tilde{q}_l \end{bmatrix} \mid Z\right\} = \begin{bmatrix} F_k^T F_k & F_k^T Z_j \\ Z_j^T F_k & Z_j^T Z_j \end{bmatrix}^{-1} \sigma^2 = H \sigma^2$$

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

Для рассматриваемой модели критерий оптимальности экспери-

мента 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:

$$M(\tilde{y}) = F_k P_k Z_j \tilde{q}_j \quad (5)$$

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

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

#### Теорема 1.

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

$$\begin{aligned} EQ_{k+j} &= M((\hat{y}(\tilde{x}_*) - y(\tilde{x}_*))^2) = \\ &= (\tilde{q}_{1-j}^T \Sigma_{\xi} \tilde{q}_{1-j} + \sigma^2) \tilde{f}^T(\tilde{x}_*) (P_k^T P_k)^{-1} \tilde{f}(\tilde{x}_*) \frac{(n-k-1)}{(n-k-j-1)} + \\ &\quad \tilde{q}^T \Sigma_e \tilde{q} + \sigma^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Интегрирование критерий  $Q$  оптимальности в среднем по

области прогноза  $\omega_1$  для моделей  $(k+j)$  будет иметь следующий вид:

$$EQ_{k+j} = (\tilde{q}_1^T - j \Sigma_e \tilde{q}_1) \int_{\omega_1} (\frac{n-k-1}{n-k-j-1}) j \tilde{f}_k^T(\tilde{x}_*) [P_k^T P_k]^{-1} \tilde{f}_k(\tilde{x}_*) d\tilde{x}_* / \int_{\omega_1} d\tilde{x}_* + \tilde{q}_1^T \Sigma_e \tilde{q}_1 + \sigma^2 \quad (7)$$

Из теоремы 1 следует, что планы  $Q$  - оптимальные в среднем для подычсся  $(k+j)$  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 метод 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  $[P_1^T P_1]^{-1}$ , число опытов  $n > 1 + 1$ , для оценивания вектора  $\tilde{p}_1$  методом наименьших квадратов используется модель (8), имеет место зависимость (2):  $\tilde{x}_*$  - вектор значений управляемых переменных в точке прогноза, тогда справедливо следующее соотношение:

$$EQ_1 = M\{(\hat{y}(\tilde{x}_*) - y(\tilde{x}_*))^2\} = (\tilde{q}_1^T \Sigma_e \tilde{q}_1 + \sigma^2) \tilde{f}_1^T(\tilde{x}_*) [P_1^T P_1]^{-1} \tilde{f}_1(\tilde{x}_*) + (\tilde{p}_{k-1}^T + \tilde{q}_1^T L_{k-1}) (\tilde{f}_{k-1}(\tilde{x}_*) - P_{k-1}^T P_1 [P_1^T P_1]^{-1} \tilde{f}_1(\tilde{x}_*)) + \tilde{f}_{k-1}^T(\tilde{x}_*) - \tilde{f}_1^T(\tilde{x}_*) (P_1^T P_1)^{-1} P_{k-1}^T P_1) (\tilde{p}_{k-1} + L_{k-1} \tilde{q}_1) + \tilde{q}_1^T \Sigma_e \tilde{q}_1 + \sigma^2 \quad (10)$$

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

$$EQ_1 = (\tilde{q}^T \Sigma_e \tilde{q} + \sigma^2) \int_{\omega I} \tilde{f}_1^T(\tilde{x}_*) [P_1^T P_1]^{-1} \tilde{f}_1(\tilde{x}_*) d\tilde{x}_* / \int_{\omega I} d\tilde{x}_* +$$

$$+ \int_{\omega I} ((P_{k-1} + L_{k-1} \tilde{q})(\tilde{f}_1^T(\tilde{x}_*) [P_1^T P_1]^{-1} P_{k-1}^T - I_k^T(\tilde{x}_*)))^2 d\tilde{x}_* / \int_{\omega I} d\tilde{x}_* +$$

$$+ \tilde{q}^T \Sigma_e \tilde{q} + \sigma^2 \quad (11)$$

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 соответствующими переменными, тогда усредненная среднеквадратическая ошибка прогноза является функцией, зависящей от плана эксперимента, вектора неизвестных параметров  $\tilde{\theta}$ , функции  $\phi$ , матрицы ковариаций  $\Sigma_e$ , а также дисперсии ошибки  $\sigma^2$ .

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

$$\hat{\tilde{\theta}} = \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^T P & P^T \Phi \\ \Phi^T P & \Phi^T \Phi \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P^T \\ \Phi^T \end{bmatrix} \tilde{y} = N \begin{bmatrix} P^T \\ \Phi^T \end{bmatrix} \tilde{y} \quad (13)$$

где  $P$   $[n, k]$  - матрица значений вектора  $\tilde{f}(\tilde{x})$  переменных в  $n$  опытах,  $\Phi$   $[n, m]$  - матрица значений вектора  $\tilde{\phi}$  в тех же  $n$  опытах.

Матрица  $N$  является случайной матрицей, зависящей как от плана эксперимента  $\omega$ , так и от распределения случайной функции  $\phi$ .

Так как структура  $\Phi$  включает различные взаимодействия между случайными сопутствующими факторами, анализ величины  $\Phi^2\Phi$  будет слишком сложен. В результате этого аналитическое решение функционала (13) даже для простейших моделей с взаимодействиями практически неразрешимая задача.

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

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

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 для сравнения двух планов за счет использования одних и тех же последовательностей для  $\tilde{z}$  и  $\epsilon$  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:

$$R = \sum_{i=1}^k v_i EQ_i + \sum_{j=1}^l v_{k+j} EQ_{k+j}, \quad (15)$$

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  $v_{k+j}$  с помощью 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:

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

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

В работе получена формула для распределения остаточной суммы квадратов, связанной с подклассом  $(k+j)$ :

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

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

Критерий  $C_p$ - Маллоуса для модели 1 имеет вид:

$$C_{1,i} = RSS_i + 2i, \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

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:

$$RSS_i \sim \chi^2(\tau - k, (\tilde{q}^T \Sigma_e \tilde{q} + c^2), \tau^2), \quad (17)$$

где  $\tau^2 = \tilde{s}_{k-1}^T P_{k-1}^{-1} P_{k-1}^{-1} \tilde{s}_{k-1}$  - параметр нецелостности,

$I_1 = I_n - P_1 (P_1^{-1} P_1)^{-1} P_1^T$  - идемпотентная матрица,

$$\tilde{s}_{k-1} = (P_{k-1}^{-1} L_{k-1} \tilde{q}).$$

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 и автоматизации технологического процесса электролитического нанесения защитного покрытия на детали стальных механизмов, в частности, нанесение 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 концентрация (г/л) меди, олова, свинца, борфторводородной 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 содержания меди в осадочном сплаве;  $y_2$  - процентное содержание свинца в осадочном сплаве;  $y_3$  - процентное содержание олова в осадочном сплаве.

Для исследуемого технологического процесса сопутствующие случайные факторы  $\tilde{z}$  зависят от управляемых факторов  $\tilde{x}$ . Из технологических условий процесса следует наличие линейной зависи-

мости вида:

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

Каждый раз измеряя 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  $G_p$ - Маллоуса была получена следующая модель:

$$y = 100 + z_1 q_1 + z_2 q_2 + z_1 z_2 q_3, \quad (20)$$

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,  $q_0 \dots q_3$  - известные 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 содержание олова ( $y_3$ ) в сплаве может быть получена из выражения  $y_1 + y_2 + y_3 = 100$ . Тогда имеет место следующая система уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = -9.2246 + 1.7015 z_1 + 0.1955 z_2 - 0.0299 z_1 z_2 \\ y_2 = 119.6677 - 5.3591 z_1 - 0.7072 z_2 + 0.1115 z_1 z_2 \\ y_3 = 100 - y_1 - y_2 \end{cases} \quad (21)$$

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  $\tilde{y} = \{y_1, y_2, y_3\}$ . 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:

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

где  $\hat{y}_i$  - оцененное значение  $i$ -ой выходной величины,  $y_i^c$  - 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 различие интервалов варьирования.

На основании разработанной в диссертации методики создано программное обеспечение для подсистемы АСУТП контроля химического состава электролита. 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 9.2% (с вероятностью 0.95) по сравнению с традиционной методикой.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основным результатом работы является разработка методов

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

экспериментальной идентификации в системе автоматизации технологического процесса гальванической обработки деталей, обеспечивающих повышение качества обрабатываемого сплава.

В частности:

1. В работе дано обоснование применения статистического принципа управления качеством выпускаемой продукции для гальванического производства.
2. Проанализированы существующие подходы к планированию эксперимента при автоматизированной идентификации и оптимизации технологических процессов со случайными сопутствующими факторами.
3. Поставлена задача планирования активно-пассивного эксперимента для построения прогнозирующих моделей в АСУТП со случайными сопутствующими факторами в гальваническом производстве.
4. Исследованы особенности построения  $Q$  - оптимальных в среднем планов, минимизирующих на множестве планов среднюю квадратическую ошибку прогноза.
5. Получены аналитические зависимости для средних значений среднеквадратической ошибки прогноза для нормального закона распределения вектора случайных сопутствующих факторов.
6. Предложен модифицированный метод случайного поиска для построения  $Q$  - оптимального в среднем плане эксперимента для модели, исключившей взаимодействие случайных сопутствующих факторов.
7. Разработан алгоритм и составлена программа построения плана активно-пассивного эксперимента с помощью предложенного модифицированного метода случайного поиска.
8. Получены условия, при которых для обобщенного критерия качества в смысле среднеквадратической ошибки прогноза для селек-

ции моделей из класса, включающего случайные сопутствующие факторы, в системе автоматизации необходимо использовать специальные алгоритмы построения плана эксперимента.

Разработана методика и проведен эксперимент в гальваническом цехе Севастопольского судоремонтного завода. Построена модель технологического процесса гальванического нанесения защитного покрытия, статистическая достоверность которой по критерию Фишера равна 95 %.

10. Создано программное обеспечение для подсистемы АСУТП контроля химического состава электролита, которое позволяет учесть влияние случайных сопутствующих факторов.

11. Внедрение разработанных на основе данной методики экспериментальной идентификации технологического процесса нанесения защитного покрытия на детали судовых механизмов, позволило снизить процент бракованных изделий на 9... %.

12. Экономический эффект от внедрения указанных исследований составляет 29 тыс. руб. в год по ценам 1991 года.

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

#### ПУБЛИКАЦИИ

I. A. I. 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, '95, 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.
3. Журавец А.И., Цуканов А.Б. Планирование активно-пассивного 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 Международного семинара "Экспериментально - статистическое моделирование в компьютерном материаловедении". Киев, 1993, с. 28.
5. Цуканов А.В., Журавец А.И. О выборе плана эксперимента для построения прогнозирующей линейной по параметрам регрессионной модели при наличии сопутствующих случайных переменных. - Деп. в ГНТЕ Украины 15.08.94, N 1654 - Ук94., с.20.
6. Журавец А.И. Планирование эксперимента для семейства регрессионных моделей в присутствии сопутствующих случайных переменных. - Деп. в ГНТЕ Украины 15.08.94, N 1651 - Ук94, с.12.
7. Журавец А.И. Об одном методе управления технологическим процессом уничтожения бытовых отходов. - Деп. в ГНТЕ Украины 15.08.94, N 1652 - Ук94, с. 7.

Журавец А.І. Методи експериментальної ідентифікації при автоматизації технологічного процесу гальванічної обробки деталей. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.13.07 - автоматизація технологічних процесів та виробництв. Севастопольський державний технічний університет. Севастополь, 1995.

Захищається рукопис на базі 7 робіт, що містять результати досліджень поліпшення якості гальванічної обробки деталей в автоматизованій системі контролю хімічного складу електроліту. Знайдені умови необхідності та методи побудови спеціальних планів експериментів. Методи розробки автоматизованих систем експериментальної ідентифікації впроваджені у підприємства.

Zhuravets A.I. Experimental identification methods in the automation of electroplating details technology process.

Candidat of technical sciences thesis, speciality 05.13.07 - automation of technology processes and productions. Sevastopol State Technical University, Sevastopol, 1995.

It is defended the manuscript based on the 7 articles containing the results of the investigations of the electroplating quality improvement in the system of automation control of the electrolyte chemical composition. Necessity conditions and construction methods of special experimental designs were found. Computer-aided experimental identification program tools were designed and introduced.

Ключеві слова: експериментальна ідентифікація, прогнозувальні моделі, селекція моделей, автоматизований технологічний процес, гальванічна обробка деталей.



Ab 21. (2)

450/100

15315  
**AV 31.751**

СЕРИЯ АИ ЧИСТОВАЯ КОПИЯ

ИЗ СПИСКА КОПИЙ

ИЗДАНИЕ 1981 ГОДА

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИЛИ ИМПРИУМУМ КОМПЕТЕНТНОГО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ЦЕНТРА  
ИЛИ ИМПРИУМУМ КОМПЕТЕНТНОГО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИЛИ ИМПРИУМУМ КОМПЕТЕНТНОГО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ЦЕНТРА  
ИЛИ ИМПРИУМУМ КОМПЕТЕНТНОГО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

1 5 3 1 5

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИЛИ ИМПРИУМУМ КОМПЕТЕНТНОГО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ЦЕНТРА  
ИЛИ ИМПРИУМУМ КОМПЕТЕНТНОГО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

1981 - 1982