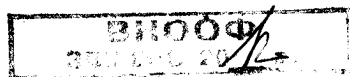


Радченко С.Г.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
МАШИНОСТРОЕНИИ**



Киев - 1998

ББК К5в647

P15

УДК 621.9:519.2

Рекомендована к изданию Ученым Советом Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт".

Рецензенты:

Степашко В.С., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и Минобразования Украины;

Хает Г.Л., доктор технических наук, профессор, Донбасская государственная машиностроительная академия, кафедра технологии машиностроения;

Тарасов А.Ф., доктор технических наук, Донбасская государственная машиностроительная академия, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования.

Радченко С.Г.

P15 Математичне моделювання технологічних процесів в машинобудуванні. — К.: ЗАТ "Укрспецмонтажпроект", 1998. — 274 с.

Досліджуються основні підходи одержання інформаційного забезпечення рішень для технологічних систем і процесів. Аналізуються основні властивості, особливості технологічних систем і процесів, як об'єктів формалізованого інформаційного опису. Викладені принципи формалізованого математичного опису технологічних процесів і наведені приклади їх використання.

Монографія буде корисна інженерам і науковим працівникам, які застосовують прикладну статистичну методологію з метою вдосконалення і створення нових технологічних процесів, об'єктів і систем, а також студентам, аспірантам і фахівцям, які використовують її методи для розв'язання реальних виробничих задач.

Радченко С.Г.

P15 Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. — К.: ЗАО "Укрспецмонтажпроект", 1998. — 274 с.

Исследуются основные подходы получения информационного обеспечения решений для технологических систем и процессов. Анализируются основные свойства, особенности технологических систем и процессов как объектов формализованного информационного описания. Изложены принципы формализованного математического описания технологических процессов и приведены примеры их использования.

Монография будет полезна инженерам и научным работникам, применяющим прикладную статистическую методологию в целях совершенствования и создания новых технологических процессов, объектов и систем, а также студентам, аспирантам и специалистам, использующим ее методы для решения реальных производственных задач.

Научное издание

Радченко Станислав Григорьевич

Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении

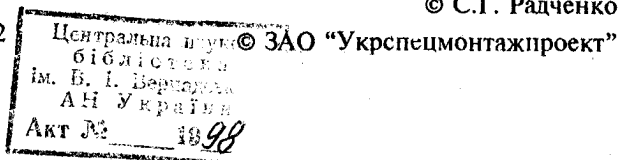
Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Р 2404010000 — 02 02 — 98
2820735 — 98

ББК К5в647

© С.Г. Радченко

ISBN 966-7412-03-2



464-13

АННОТАЦИЯ

Исследуются основные подходы получения информационного обеспечения решений для технологических систем и процессов. Анализируются основные свойства, особенности технологических систем и процессов как объектов формализованного информационного описания. Изложены принципы формализованного математического описания технологических процессов. Впервые разработаны условия и алгоритм формализованного получения структуры многофакторной математической модели для реальных условий технологического эксперимента. Рассматривается устойчивость математического моделирования технологических процессов к малым и неизбежным отклонениям от принятых предпосылок формализованного описания. Исследуется последовательная многофакторная схема формирования структуры уравнения регрессии и проведения технологического эксперимента. Впервые вводится понятие плана эксперимента, устойчивого к выбору структуры многофакторных математических моделей, и исследуются три подхода к их построению для различных начальных условий. Впервые разработаны методы устойчивого оценивания коэффициентов многофакторного уравнения регрессии (алгоритм RASTA) в условиях сопряженности (мультиколлинеарности) факторов. Исследовано выполнение предпосылок регрессионного анализа и рассмотрена проблема формирования критериев качества многофакторного уравнения регрессии. Сформулированы основные отличительные особенности интеллектуального программного средства "Планирование, регрессия и анализ моделей". Приведены полученные многофакторные математические модели технологических систем и процессов. Изложен принцип информационной коррекции поверхности отклика в факторном пространстве и поставленной цели для совершенствования технологических и других систем. Приведены результаты практического применения разработанной информационной технологии.

Монография будет полезна инженерам и научным работникам, применяющим прикладную статистическую методологию в целях совершенствования и создания новых технологических процессов, объектов и систем, а также студентам, аспирантам и специалистам, использующим ее методы для решения реальных производственных задач.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	13
Глава 1 Основные подходы в получении информационного обеспечения технологических решений.....	18
1.1 Повышение значимости информационного обеспечения технологических, технических решений и научных исследований.....	19
1.2 Роль современной эффективной научной методологии в получении новых научных результатов, выпуске наукоемкой продукции.....	21
1.3 Методология обеспечения высокого качества наукоемкой продукции.....	22
1.4 Существующая методология получения научной информации о технологических системах.....	25
1.5 Номографический и идиографический подходы в описании объектов реальной действительности.....	31
1.6 Современная методология проведения экспериментальных научных исследований — основной подход в получении технологической и технической информации. Неформализуемая информация.....	35
1.7 Возрастание роли экспериментальных, вычислительных, кибернетических методологий в получении технологической информации.....	37
1.8 Теория планирования эксперимента, вычислительный эксперимент — современная методология проведения экспериментальных научных исследований.....	39
1.9 Существующие методы математического моделирования технологических систем, их критический анализ.....	41
1.10 Основные выводы.....	45
Глава 2 Анализ свойств технологической системы.....	48
2.1 Технологическая система как объект формализованного информационного описания. Определение технологической системы.....	49
2.2 Значение и статус современных высокопроизводительных технологий.....	49
2.3 Проблема качества производства изделий.....	51
2.4 Анализ факторов технологической системы и их классификации.....	54
2.5 Анализ свойств параметров качества машин. Классификация их на детерминированные, вероятностные и индетерминированные (адаптивные).....	56
2.6 Технологические и технические системы как объекты с неполной информацией об их содержательных свойствах.....	64
2.7 Статус реальной технологической системы.....	66
2.8 Принципы синтеза формализованного описания для систем с неполной информацией их содержательных свойств.....	70
2.9 Основные выводы.....	71

Глава 3	Формализованное описание технологических и технических систем	74
3.1	Формализованное описание объективной реальности на основе принципа аппроксимации.....	76
3.2	Проблема структурной связи факторов с параметрами качества машин.....	77
3.2.1	Установление структурной связи на основе содержательного анализа и вскрытия механизмов происходящих явлений	79
3.2.2	Формализованный поиск структурной связи на основе аппроксимации исходных данных технологической системы, полученных по плану эксперимента.....	80
3.3	Преимущества и недостатки первого и второго подходов, их возможности при формализованном описании сложных систем	82
3.4	Принципы получения линейных относительно параметров полиномиальных математических моделей (в вещественном евклидовом пространстве).....	85
3.5	Устойчивость математического моделирования технологических систем к малым отклонениям от принятых предпосылок формализованного описания.....	88
3.6	Проблема плохо обусловленных систем и, как следствие ее, некорректно поставленных задач.....	90
3.7	Два подхода в решении проблемы некорректно поставленных задач.....	93
3.8	Принцип структурной минимизации при синтезе математических моделей с использованием формализованного подхода.....	96
3.9	Основные выводы.....	97
Глава 4	Последовательная многофакторная схема получения "наилучшего" уравнения регрессии и проведения экспериментального исследования.....	101
4.1	Схемы полного и дробного факторного эксперимента. Взаимодействие факторов и формализованное описание системных свойств..	102
4.2	Необходимые и достаточные условия получения "наилучшего" уравнения регрессии.....	105
4.3	Постулирование структуры математической модели и проблема ее адекватности.....	107
4.4	Принцип последовательного расширения структуры математической модели и последовательная схема проведения экспериментального исследования.....	108
4.5	Формирование плана эксперимента на основе условия пропорциональности частот уровней факторов.....	114
4.6	Синтез многофакторных последовательных квази-D-оптимальных планов экспериментов	119

4.7	Планирование эксперимента на основе ЛП _T равномерно распределенных последовательностей	121
4.8	Информационные возможности различных планов последовательного проведения эксперимента	127
4.9	Основные выводы	133
Глава 5 Устойчивое оценивание коэффициентов многофакторного уравнения регрессии в условиях мультиколлинеарности факторов.....		136
5.1	Мультиколлинеарность факторов при решении типичных технологических задач. Проблема мультиколлинеарности факторов в множественном регрессионном анализе	137
5.2	Принципы создания структур данных с устойчивыми свойствами оценок коэффициентов многофакторного уравнения регрессии из исходных некорректных условий (алгоритм RASTA)	141
5.2.1	Отображение области прообраза планирования эксперимента в область образа математического моделирования.....	141
5.2.2	Планирование эксперимента с фиктивными факторами (фрагмент PRELE).....	145
5.2.3	Использование оптимальных координат факторного пространства	146
5.3	Типичные классы задач, решаемые с использованием алгоритма RASTA.....	151
5.4	Исследование информационных свойств многофакторных уравнений регрессии, полученных из исходных некорректных условий	153
5.5	Основные вывод	153
Глава 6 Выполнение предпосылок регрессионного анализа и проблема формирования критериев качества многофакторного уравнения регрессии.....		156
6.1	Система предпосылок регрессионного анализа и ее выполнение при проведении прикладных исследований	157
6.2	Проблема прикладного статистического анализа многофакторного уравнения регрессии для линейной относительно параметров математической модели.....	164
6.3	Установление информативного подмножества главных эффектов и взаимодействий факторов	165
6.4	Устойчивость (корректность) структуры математической модели и значений оценок коэффициентов.....	167
6.5	Проверки математической модели на статистическую значимость, информационную эффективность, адекватность, информативность, устойчивость коэффициентов, эффективность извлечения полезной информации из исходных данных.....	169

6.6 Проблемы создания интеллектуальных программных средств для системной обработки результатов экспериментов	172
6.7. Программное средство "Планирование, регрессия и анализ моделей"	174
6.8 Основные выводы	176
Глава 7 Математическое моделирование многофакторных технологических систем	179
7.1 Математическое моделирование упругих деформаций технологической системы	180
7.2 Математическое моделирование и оптимизация конструкции и технологии изготовления спиральных монолитных твердосплавных сверл (СМТС) по критерию стойкости. Системный анализ влияния факторов на критерии качества технологического процесса.....	183
7.3 Математическое моделирование и оптимизация технологических условий сварки полиэтиленовых труб по системному критерию качества	188
7.4 Математическое моделирование шестикомпонентных тензометрических измерительных систем	192
7.5 Принцип информационной коррекции переменных систематических ошибок технологических систем, измерительных технологических средств	197
7.6 Многофакторное математическое моделирование высоковольтной термонапряженной изоляции термоаппаратов.....	200
7.7 Основные теоретические и прикладные результаты математического моделирования технологических систем.....	211
Глава 8 Эффективность практического применения стохастических моделей	212
8.1 Основные результаты работы с промышленностью, научно-исследовательскими институтами, вузами по внедрению современной методологии проведения экспериментальных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.....	212
8.2 Фактические основные полученные результаты: технологические, технические, экономические, методологические.....	219
Заключение	223
Приложение А.....	225
Список литературы	235
Именной указатель.....	259
Предметный указатель.....	265

ANNOTATION

The main approaches of the obtaining of the informational provision of solutions for the technological systems and processes are studied. The main properties, peculiarities of technological systems and processes as the objects of the formalized informational description are analyzed. Principles of the formalized mathematical description of the technological processes are presented. For the first time the conditions and algorithm of the formalized obtaining of the structure of the multifactoral mathematical model for the arbitrary conditions of the technological experiment have been elaborated. The stability of the mathematical modeling of the technological processes to the small and inevitable deviations from the accepted prerequisites of the formalized description is considered. The consecutive multifactoral scheme of the formation of the regression equation structure and carrying out of the technological experiment is investigated. For the first time it is introduced the conception of the plan of the experiment stable to the choice of the multifactoral mathematical models structure and three approaches to their construction for different initial conditions are researched. For the first time there have been developed the methods of the stable estimation of the coefficients of the multifactoral regression equation (RASTA algorithm) under the condition of the factors conjugation (multicollinearity). The fulfilment of the prerequisites of the regression analysis was studied and the problem of formation of the quality criteria of the multifactoral regression equation was considered. The main distinctive peculiarities of the intellectual software "Planning, regression and analysis of models" are given. There are also presented the obtained multifactoral mathematical models of the technological systems and processes. The principle of the informational correction of the response surface in the factorial space and in the accepted aim for the perfection of the technological and other systems is given. The results of practical application of the developed informational technology are presented.

The book will be useful for the students, post-graduates and specialists who uses the applied statistical methodology for the solving of the real industrial problems, and also for a wide range of the industrial and scientific workers, who applies its methods for the perfection and creation of new processes, objects and systems.

CONTENTS

Introduction.....	13
Chapter 1 Main approaches of obtaining informational provision of technological solutions	18
1.1 Increase of the significance of the informational provision of the technological, technical solutions and scientific researches.....	19
1.2 Role of the modern effective scientific methodology in obtaining new scientific results in yield science-intensive production.....	21
1.3 Methodology of providing of the high quality science-intensive production.....	22
1.4 Existing methodology of obtaining of the scientific information about technological systems	25
1.5 Nomographic and idiographic approaches in the description of objects of existing reality.....	31
1.6 Modern methodology of the experimental scientific researches – the main approach in obtaining of the technological and technical information. Unformalizing information.....	35
1.7 The increase of the role of experimental, computing and cybernetic methodologies in obtaining of the technological information.....	37
1.8 Theory of planning of experiment, computing experiment – modern methodology of conducting of the experimental scientific researches...	39
1.9 Existing methods of mathematical modeling of technological systems, their critical analysis	41
1.10 Main conclusions	45
Chapter 2 Analysis of the properties of technological system.....	48
2.1 Technological system as an object of formalized informational description. Determination of technological system	49
2.2 Meaning and status of the modern high-productive technology	49
2.3 Problem of the quality of production of the industrial goods.....	51
2.4 Analysis of the technological system factors and their classifications..	54
2.5 Analysis of the properties of the parameters of quality of machines. Their classification into determining, probabilistic, indetermining (adapting)	56
2.6 Technological and technical systems as objects with incomplete information about their substantial properties.....	64
2.7 Status of the real technological system.....	66
2.8 Principles of synthesis of the formalized description for systems with incomplete information about their substantial properties.....	70
2.9 Main conclusions	71

Chapter 3 Formalized description of the technological and technical systems.....	74
3.1 Formalized description of objective reality on the basis of the principle of approximation.....	76
3.2 Problem of structural link of factors with the parameters of quality of machines	77
3.2.1 Establishment of structural link on the basis of substantial analysis and discovery of the mechanisms of the occurring phenomena .	79
3.2.2 Formalized search of structural link on the basis of approximation of initial data of technological system obtained by plan of experiment.....	80
3.3 The advantages and disadvantages of the first and second approaches, their possibilities during formalized description of complex systems....	82
3.4 Principles of the obtaining of the polynomial mathematical models linear in relation to parametrs (in material euclidean space).....	85
3.5 The stability of mathematical modeling of technological systems to small deviations from the accepted prerequisites of the formalized description.....	88
3.6 Problem of badly stipulated systems and as its consequence incorrect construction of tasks	90
3.7 Two approaches in solving the problem of incorrect constructed tasks ...	93
3.8 Principle of structural minimization during the synthesis of mathematical models with the use of formalized approach	96
3.9 Main conclusions	97
Chapter 4 Sequential multifactoral scheme of obtaining of the "best" regression equation and conducting of experimental research	101
4.1 Schemes of the complete and fractional factorial experiment. Interaction of factors and formalized description of the systemic properties...	102
4.2 Essential and sufficient conditions of obtaining of the "best" regression equation	105
4.3 Postulation of structure of the mathematical model and the problem of its adequateness	107
4.4 Principle of the sequential expansion of structure of the mathematical model and the sequential scheme of conducting of the experimental research	108
4.5 Formation of the plan of experiment on the basis of the condition of the proportional frequencies of levels of factors.....	114
4.6 Synthesis of multifactoral sequential quasi-D-optimum plans of experiments.....	119

4.7 Planning of experiment on the basis of the Π_{τ} uniformly distributed sequences	121
4.8 Informational opportunities of different plans of the sequential conducting of experiment.....	127
4.9 Main conclusions.....	133
Chapter 5 Stable valuation of the coefficients of the multifactoral regression equation under condition of multicollinearity of factors.....	136
5.1 Multicollinearity of factors during the solution of typical technological problems. Problem of multicollinearity of factors in multiple regression analysis.....	137
5.2 Principles of creating of the structures of data with stable characteristics of estimation of coefficients of the multifactoral regression equation from the initial incorrect conditions (RASTA algorithm).....	141
5.2.1 Reflection of the field of the prototype of planning of experiment into the field of image of mathematical modeling.....	141
5.2.2 Planning of experiment with the fictitious factors (PRELE fragment).....	145
5.2.3 Use of the optimum co-ordinates of the factorial space	146
5.3 Typical classes of problem, solved with the use of RASTA algorithm....	151
5.4 Research of the informational characteristics of the multifactoral regression equation obtained from the initial incorrect conditions.....	153
5.5 Main conclusions.....	153
Chapter 6 Fulfilment of the prerequisites of the regression analysis and problem of forming of the quality criteria of the multifactoral regression equation	156
6.1 System of prerequisites of the regression analysis and its fulfilment under the carrying out of the applied researches	157
6.2 Problem of the applied statistical analysis of multifactoral regression equation for the mathematical model linear in relation to the it parameters.....	164
6.3 Establishment of the informative submultitude of main effects and interactions of factors.....	165
6.4. Stability (correctness) of structure of mathematical model and the meanings of the estimations of coefficients.....	167
6.5 Verifications of mathematical model on statistical significance, informational effectiveness, adequateness, informativeness, stability of coefficients, effectiveness of extraction of useful information from initial data.....	169
6.6 Problems of creating of the intellectual software for the systemic processing of results of experiments.....	172

6.7 Software "Planning, regression and analysis of models"	174
6.8 Main conclusions	176
Chapter 7 Mathematical modeling of the multifactoral technological systems.....	179
7.1 Mathematical modeling of the elastic deformation of the technological system	180
7.2 Mathematical modeling and optimization of construction and technology of production of the spiral monolithic hardalloyed drills (SMHD) on the durability criterion. Systemic analysis of the influence of the factors on the quality criteria of technological process.....	183
7.3 Mathematical modeling and optimization of technological conditions of weld of polyethylenic pipes on the systemic quality criterion.....	188
7.4 Mathematical modeling of the sixcomponential tensometric measuring systems.....	192
7.5 Principle of the informational correction of the variable systematic errors of the technological systems, measuring technological devices.	197
7.6 Multifactoral mathematical modeling of the high-voltage thermo-stress isolation of thermoapparatus	200
7.7 Main theoretical and applied results of mathematical modeling of technological systems	211
Chapter 8 Effectiveness of practical application of stochastic models ..	212
8.1 Main results of work with industry, scientific-researching institutes, institutes of high education for application of the modern methodology of carrying out of the experimental scientific researching and experimental-design works.....	212
8.2 Factual main obtained results: technological, technical, economical, methodological.....	219
Conclusion.....	223
Appendix A.....	225
Bibliography	235
Nominal index.....	259
Subject index	265

Существует естественный и не совершенный опыт, который ... не отдает себе отчета в своих приемах; им пользуются ремесленники, но не ученые. Выше его, выше всех умозрительных знаний и искусств стоит умение производить опыты, и эта наука есть царица наук.

Роджер Бэкон

Ни голая рука, ни предоставленный самому себе разум не имеют большой силы. Дело совершается орудиями и вспоможениями, которые нужны разуму не меньше, чем руке.

Фрэнсис Бэкон

Итак, все законы выводятся из опыта. Но для выражения их нужен специальный язык. Обиходный язык слишком беден; кроме того, он слишком неясен для выражения столь богатых содержанием точных и тонких соотношений.

Анри Пуанкаре

ВВЕДЕНИЕ

В монографии изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований по установлению формализованных информационных связей исходных свойств заготовок, характеристик технологического инструмента, оборудования, режимов обработки и параметров качества машин с целью их совершенствования.

Рассмотрена постановка проблемы информационного обеспечения процесса изготовления машин, результаты решения которой могут быть использованы для практического определения оптимальных (или рациональных) условий проведения технологических процессов или установления связей между исходным комплексом условий реализации технологического процесса и параметрами качества изготавливаемой машины. Исследованы возможности различных подходов (теоретико-аналитического, экспериментально-статистического, вычислительного эксперимента, эвристического, получения информации из банков данных) для решения поставленной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение. Проанализированы технологическая система и технические объекты как объекты формализованного информационного описания, установлены их основные свойства с точки зрения выбора определенного подхода для получения формализованного описания.

Основное внимание уделено выработке таких способов получения математических моделей, которые позволяли бы формализованно, своевременно, со сравнительно малыми затратами ресурсов получать устойчивые, адекватные, информативные и эффективные математические модели реальных технологических систем и технических объектов. Формализация математического описания рассматривается с позиций прикладной математики как науки об оптимальных или о практически приемлемых методах решения математических задач, возникающих вне математики. Показано, что такое решение могут обеспечить экспериментально-статистический и эвристический подходы, вычислительный эксперимент.

Разработаны основные методы формализованного получения стохастических моделей параметров качества машин: синтез квазирегулярных дробных факторных планов последовательных экспериментов, методика выбора структуры математических моделей, оценка качества полученных математических моделей в условиях мультиколлинеарности, решение обратных задач стохастического моделирования. Синтез планов последовательных экспериментов обеспечивается разработанным алгоритмом и программой численного определения квазиоптимальных матриц планов экспериментов. Получение, анализ и проверка стохастических моделей проводились с помощью разработанного пакета прикладных программ "Планирование, регрессия и анализ моделей" (ППП ПРИАМ).

Разработанные методы получения стохастических моделей позволяют формализованно описывать параметры качества машин с учетом реальных условий их изготовления или работы и вводить в модели до 8—20 количественных и (или) качественных факторов при доступном числе проведенных экспериментов (до 32—64).

Развитое в работе направление получения стохастических моделей позволяет решать следующие основные типы технологических задач:

1. Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов с целью достижения требуемых параметров качества, сокращения сырьевых, материальных затрат, повышения производительности труда, снижения себестоимости на единицу производимой продукции.
2. Оптимизация и математическое моделирование размерно-геометрических параметров, показателей качества выпускаемых изделий (деталей, инструмента, машин, приборов, оборудования).
3. Минимизация трудоемкости, стоимости, материальных и энергетических затрат при проведении испытаний (отладке) новой технологии, машин, продукции.
4. Минимизация погрешностей измерения при исследовании сложных показателей качества технологических процессов, объектов продукции.
5. Математическое моделирование многокомпонентных датчиков первичной технологической информации систем контроля и управления, средств измерений и технологических информационно-измерительных систем.

6. Использование оптимизации и математического моделирования в автоматизированных системах управления технологическими процессами, оборудованием, производством.

Структурная схема формализованного описания технологических систем с указанием глав и разделов книги приведена на рис. В.1.

Разработанные методы ориентированы не только на решения информационных задач по созданию прогрессивных технологических процессов, но и могут быть использованы для получения математических моделей разнообразных сложных объектов, процессов, систем, позволяющих оптимальным образом конструировать условия проведения с ними эксперимента.

В технологической области исследования направлены на разработку прикладных методов информационного обеспечения качества машин; повышение эффективности технологических процессов изготовления машины по критериям качества, производительности и себестоимости.

Разработанная информационная технология может быть использована для обеспечения качества машин путем формализованного синтеза стохастических математических моделей, используемых для нахождения эффективных технологических решений по созданию прогрессивных технологических процессов, совершенствованию и созданию высокопроизводительных машин, инструментов, аппаратов, приборов.

В рамках развиваемого направления по получению стохастических моделей с формализованным выбором структуры и значений коэффициентов представляется возможным решать на ЭВМ широкий класс задач по моделированию технологических процессов и объектов, используя для этого разработанные типовые алгоритмы и программы. Решение указанных задач традиционными методами либо невозможно, либо требует значительных затрат ресурсов (временных, интеллектуальных, материальных и др.), либо не эффективно по достигнутым результатам. Первичной информацией для получения моделей являются исходные данные экспериментов, проведенных по специальному плану, результаты моделирования на ЭВМ методом статистических испытаний, трудоемкие вычисления, требующие значительных затрат времени, экспертные оценки.

Разработанные методы многофакторного математического моделирования относительно доступны, просты в реализации, результативны и экономичны. Их возможно применять в вычислительных, экспериментальных и экспертных постановках задач. Принципиальными преимуществами являются: универсальность алгоритмов, программного обеспечения многокритериальной оптимизации и многофакторного математического моделирования; получение высококачественной, системной научной информации; ускорение проведения НИОКР. Заложены предпосылки для решения задач принципиально более высокой сложности и системности, а следовательно, и создания более совершенных конструкций, приборов и технологий. С использованием разработанной информационной технологии и программного средства "Плани-

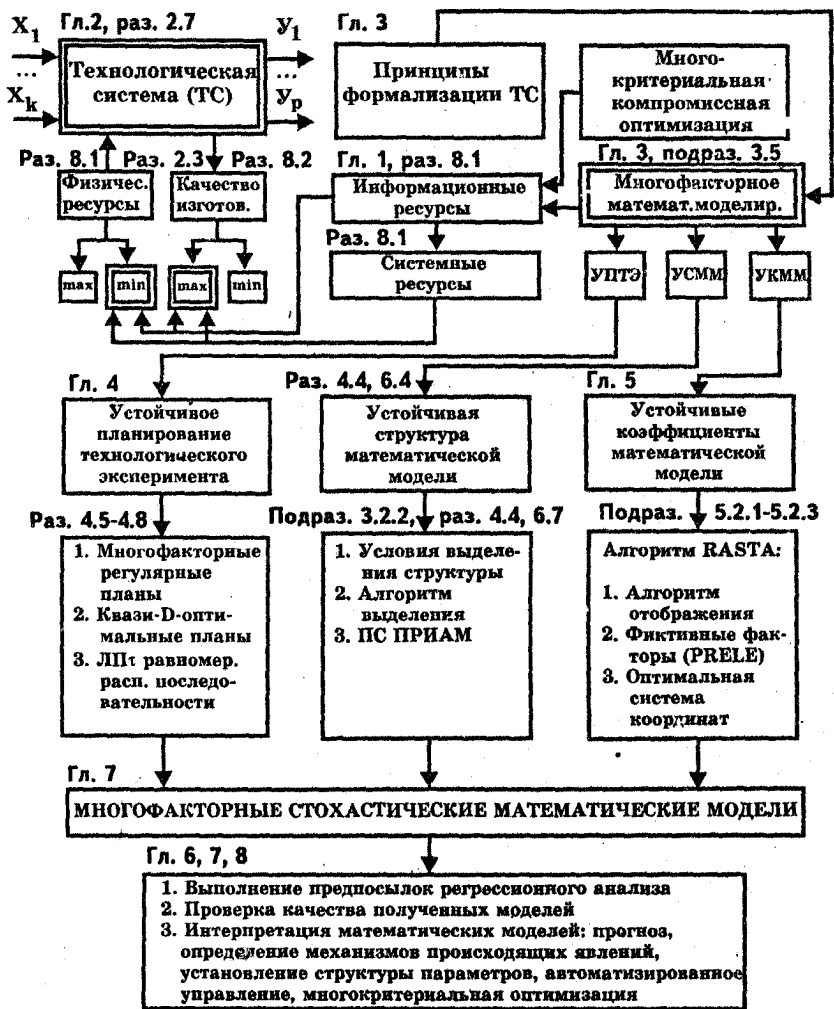


Рис. В.1. Структурная схема формализованного описания технологических систем (с указанием глав и разделов книги)

рование, регрессия и анализ моделей" были выполнены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы на Киевском механическом заводе им. О.К. Антонова (в настоящее время Авиационный научно-технический комплекс "Антонов"), в.ч. 75360, Киевском филиале ВНИИМонтажспецстрой, СКТБ Института проблем материаловедения АН УССР (г. Киев), ПО им. С.П. Королева (г. Киев), Институте сверхтвердых материалов АН УССР (г. Киев), НИИ вакуумно-электронного машиностроения (г. Ижевск), в.ч. 36875 и других организациях.

Книга будет полезна студентам, аспирантам и специалистам, использующим прикладную статистическую методологию для решения реальных производственных задач, а также широкому кругу инженеров и научных работников, использующих ее методы в целях совершенствования и создания новых процессов, объектов, систем.

Отзывы и замечания просьба слать по адресу: 252056, Киев-56, проспект Перемоги, 37. Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт". Кафедра технологии машиностроения — 1230. Радченко Станиславу Григорьевичу.

Телефоны: 380 (44) 441-17-55; 213-13-39.

Глава 1 Основные подходы в получении информационного обеспечения технологических решений

Общепризнанной среди ученых и инженеров является точка зрения о необходимости совершенствования технологических процессов производства в целях сокращения разнообразных затрат, повышения производительности труда, улучшения качества выпускаемых изделий. Без современных (часто называют высокими) технологий перестройка экономики Украины как молодого государства не возможна. 90 % экспорта Украины (1993 г.) приходится на сырье: металл, большую химию и минеральные удобрения, уголь. В сложившейся ситуации, по мнению президента НАН Украины акад. Б.Е. Патона, необходим переход к более четкой и суровой политике приоритетов в обеспечении фундаментальных и прикладных наук, развитии наукоемкого производства, основанного на высоких технологиях и выпускающей конкурентно-способную продукцию; обеспечению в будущем технологической независимости Украины [1, с. 4].

Для создания современных технологий необходимо информационное обеспечение технологических процессов. Под информацией в общетехническом плане будем понимать совокупность качественных данных, выражаемых при помощи цифр, графиков, математических формул и выражений, используемых для прогноза, управления, оптимизации применяемых в производстве технологических и технических систем. В системном плане под информацией понимается количественная мера устранения энтропии (неопределенности), мера организации системы, необходимая для достижения поставленной перед системой целей. Без должного обеспечения информацией технологических систем достижение поставленных перед ними целей не возможно или не эффективно, так как связано с большими затратами.

Использование информации необходимо для совершенствования технологических систем. По мнению акад. А.Ю. Ишлинского, представляется актуальным массовое внедрение математического и физического моделирования в технологическую практику, математического обеспечения для анализа и управления технологическими процессами с использованием компьютеров и разработкой на этой основе новых технологий [2, с. 15].

Однако, использование информации, развертывание процесса информатизации следует признать неудовлетворительным. "В результате отставание от ведущих капиталистических стран в этой области можно характеризовать уже не как "стратегически опасное", а как намечающийся "цивилизационный разрыв." Отношение важнейших показателей информатизации для СССР и США (1988 г.— Р.С.) колеблется в диапазоне от 0,1 до 0,01" [3, с. 1].

На пути к информационному обеспечению технологических процессов и систем необходимо рассмотреть основные подходы его получения и выбрать наилучшие.

1.1 Повышение значимости информационного обеспечения технологических, технических решений и научных исследований

Одна из особенностей развития современной науки — проведение наравне с фундаментальными исследованиями значительных разработок и реализаций наукоемких исследований для производства. Кроме использования традиционных ресурсов такие исследования требуют значительного обеспечения: методологического, интеллектуального, информационного, кадрового. На заре создания вычислительных машин такой путь развития науки предвосхитил Дж. фон Нейман, который предсказывал концентрацию науки в будущем вокруг проблем организации, структуры, языка, информации, программирования и управления [4, с. 6].

Постепенно целенаправленное использование информации для принятия решений приобретает большее значение, чем традиционное машинное производство товаров. Причина здесь в том, что информацию необходимо рассматривать как ресурс нового вида, высокой эффективности и замещающий живой труд, сырье и энергию [5, с. 115].

Интересно и поучительно познакомиться с количественными характеристиками эффективности информации, которую используют в науке и производстве. Эффективность готовой информации в 3 раза выше эффективности образования, в 6 раз — научно-технического прогресса, в 12 — капитала и в 18-25 раз — недвижимости [6, с. 2]. Суммарная отдача от использования высококвалифицированного ученого и инженера примерно в 20 раз превышает затраты на его подготовку. Чистый "выигрыш" от привлечения в США специалистов других государств в 70-е годы оценивался в 230 тыс. долл. в расчете на одного "усредненного" ученого [7, с. 31]. Прибыль от информации, полученной в результате профилактики, доходит до 500:1 [8, с. 112]. Затраты на исправление допущенного дефекта в электронике по данным фирмы "Хьюлетт-Паккард" превышают до 500 раз на этапе сборки; 7500 раз при обнаружении в изделии, уже проданном покупателю. По данным фирмы ИБМ (International Business Machines) стоимость обнаружения дефекта у заказчика в период эксплуатации в 50 раз превышает затраты во время изготовления узла. В программном обеспечении эти затраты возрастают в 80 раз [8, с. 181].

Для современного этапа развития науки определяющими тенденциями являются: технологизация фундаментальных и прикладных исследований и развитие информационных технологий. Новые проблемы и вытекающие из них задачи таковы, что решить их старыми методами и технологиями невозможно. Согласно последним оценкам фирмы International Data Corporation (IDC) в 1996 г. на информационные технологии во всем мире было израсходовано 680 млрд. долл. Информационные технологии предназначены для

наилучшего решения различных процессов, происходящих в науке, образовании, производстве, обществе и других сферах человеческой деятельности.

Систематическое усовершенствование производственных технологий в микроэлектронике привели к тому, что за 20 лет стоимость одного транзистора снизилась в миллион раз. Без использования информационных технологий создание наукоемких изделий, высоких технологий их производства, проведение необходимых испытаний, оптимальная эксплуатация изделий не представляются возможными.

Из приведенных фактов следует вывод: решения, принимаемые специалистом, будут тем эффективнее и целесообразнее, чем более он будет снабжен полезной информацией.

Промышленно развитые страны мира уделяют получению необходимой информации значительные силы и ресурсы. В 1990 г. в информационном (нематериальном) секторе США было занято более 50 % всей рабочей силы [9, с. 16]. Одна из главных задач Министерства внешней торговли и промышленности Японии — сбор в Японии и за рубежом научно-технической информации, которая была бы полезной для промышленности [10, с. 58]. Япония поставила задачу перевести к 2000 г. свою экономику на информационную базу с конечной целью воплощения знаний в наукоемкие изделия, в патенты, лицензии, технологию организации и управления производством [11, с. 14].

На получение необходимой информации лидеры промышленного производства мира затрачивают огромные средства. Общие расходы промышленности США на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в 1987 г. составили 59,5 млрд. долл., что на 4,9 % больше, чем в 1986 г. [12, с. 33]. Потратив 9 млрд. долл. на покупку технологии в США Япония только в 1986 г. продала товаров в США на 58 млрд. долл. больше, чем купила у них [10, с. 59].

На смену показателей мощи государства в виде добываемых ресурсов — нефть, газ, уголь — и первичного сырья — чугун, сталь, древесина — пришли новые: информация и технологические процессы производства. Информацию правомерно рассматривать как средство производства наравне с оборудованием, инструментом, приборами. Акад. А.А. Стогний отмечает, что "информация вместе с сырьевыми, энергетическими и производственными ресурсами превратилась в ведущий показатель промышленного развития стран. ...в народном хозяйстве степень информационного обеспечения влияет на количество материальных, трудовых и энергетических ресурсов, которые используются" [13, с. 8].

Вместе с важнейшими проявлениями реального мира — материей, энергией, существующими в пространстве и времени, информация есть свойство всех материальных объектов и результат познающей и производственной деятельности человека. Взаимодействие систем связано с обменом информацией.

Успешную экономическую деятельность государства специалисты связывают с использованием информационных ресурсов и их промышленной эксплуатацией. "... информация становится для промышленно развитых стран одним из наиболее важных национальных ресурсов. В конце этого столетия информационные ресурсы станут основным национальным богатством, а эффективность их промышленной эксплуатации во все большей степени будет определять энергетическую мощь страны в целом" [14, с. 7].

1.2 Роль современной эффективной научной методологии в получении новых научных результатов, выпуске наукоемкой продукции

Аналитики, ищущие пути выхода Украины из экономического кризиса, считают, что развитые страны Запада и Востока не будут оказывать научно-техническую помощь Украине, пока не убедятся в возможности самостоятельного выхода из кризисного состояния ее промышленности [15, с. 6]. Такая модернизация возможна через новые научные, технологические, технические результаты, открывающие путь к выпуску наукоемкой продукции.

В получении новых результатов не только сами результаты исследований, но и ведущий к ним путь должен быть истинным [16, с. 7]. Необходимы изменения в методологии проведения исследований, без которых, по мнению акад. А.А. Самарского, "нельзя рассчитывать на принципиально новые решения ключевых проблем, на качественные сдвиги. Методологическое обновление возможно лишь на основе математизации научно-технической революции, ибо нужны точные и глубокие прогнозы, конкретные количественные характеристики, получаемые относительно быстро и дешево" [17, с. 24]. В основе такой методологии должно быть математическое моделирование и многокритериальная оптимизация.

Методология является вооружением нашего интеллекта. Научная методология не только формулирует проблему, но и освещает путь ее решения; правильно оценивает оптимальный результат. Особенно важно использование методологии системно-структурного анализа [159].

При оптимизации и моделировании сложных систем правильный выбор методического обеспечения работ позволяет изменить затраты на проектирование, его сроки и качество результатов (при прочих равных условиях) в три, четыре раза и более [18, с. 145].

Сложным, ответственным и неформальным этапом в формировании методологии исследования является поиск такого математического аппарата, который соответствовал бы свойствам моделируемых процессов и эффективно решал бы поставленную задачу.

Решающим фактором эффективности самой математической модели оказываются методы, алгоритмы, а также неформальные "маленькие хитрости". Специалисты отмечают, что время, затрачиваемое на машинное реше-

ние некоторой модельной задачи, может колебаться в 10 и более раз в зависимости от профессионального уровня ее постановки, алгоритмизации и программирования [18, с. 56].

Определяющую роль научной методологии в инженерных и, в частности, технологических исследованиях трудно переоценить. Создание логической, математической, физической модели должно основываться на прочном геосеологическом фундаменте [19, с. 75–76].

Методология в определенной предметной области исследований, будучи в достаточной степени разработанной, становится неразрывной частью этой научной области. Так по мнению проф. М.И. Клушина, "методология постановки эксперимента и математической интерпретации его результатов является органической и весьма важной частью методологии теории обработки металлов резанием в целом" [20, с. 7]. Анализ применения математических методов в различных прикладных областях исследований полностью подтверждает сформулированное положение.

С 1975 г. мы использовали методы многофакторного математического моделирования и многокритериальной оптимизации в целях совершенствования агрегатов, узлов, систем и летательных аппаратов на Авиационном научно-техническом комплексе им. О.К. Антонова [21]. По результатам многолетних исследований был получен определенный экономический эффект. Использование аналогичных методов при испытании модели крыла азробуса А-310 в аэродинамической трубе позволило на 20 % снизить расход топлива. При 15-летнем ресурсе эксплуатации экономический эффект для партии из 400 самолетов должен составить 10 млрд. долл. [22, с. 31].

Опыт экономически развитых стран показывает, что информация и интеллектуальные разработки специалистов вносят наибольший вклад в экономику. Знания, полученные через методологию исследований и воплощенные в технологию и наукоемкую продукцию, дают максимально возможный экономический эффект.

1.3 Методология обеспечения высокого качества наукоемкой продукции

Обеспечение высокого качества наукоемкой продукции представляет сложную комплексную проблему. Еще в 1966 г. проф. Б.С. Балакшин отмечал, что одновременное достижение высокого качества машины при ее наименьшей себестоимости представляет методически чрезвычайно сложную задачу [23, с. 7]. Все более объективно возрастающая сложность систем ограничивает возможность их точной смысловой интерпретации. Проф. Л.А. Заде считает, что "по мере возрастания сложности системы наша способность формулировать точные, содержащие смысл утверждения о ее поведении, уменьшается вплоть до некоторого порога, за которым точность и смысл становятся взаимоисключающими" [24]. Причины такого положения в

многофакторности, сложном характере взаимовлияния факторов, взаимосвязи критериев качества между собой и неопределенности как состояния технологической (технической) системы в текущий момент времени, так и ее поведения в будущем.

Уровень наукоемкости и эффективности производства на Украине в 1992 г. характеризовался следующими цифрами. По оценке президента Центра рыночных реформ известного экономиста проф. В.Г. Ланового энергетическая и материалоемкость производства Украины в 1,4–1,5 раза выше средневропейского уровня и поэтому закупки нефти и газа вдвое больше, чем у западных соседей. Производство энергии очень большое и крайне низкий КПД ее использования — не более 12–15 % [25, с. 4]. По данным заместителя министра финансов Б.В. Соболева Украина в 1992 г. экспортировала 90 % сырья и только 7 % готовой продукции. Структура экспорта развитых стран мира составила примерно 50 % готовой продукции, 20 % коммерческих услуг и 20 % сырья [26, с. 2].

Состояние экономики Украины в основном было определено предшествующим состоянием экономики Союза. Уровень комплексного показателя научно-технического развития, в который входят уровень производительности труда в обрабатывающей промышленности, объем производства сопоставимых видов наукоемкой продукции, ее доли в общем объеме производства и затрат и другие компоненты, для СССР в 1988 г. составил 20–25 % от уровня США [27, с. 30]. Показатели наукоемкости в СССР были ниже, чем в США: в машиностроении — в 2, в черной металлургии — в 3, в топливной промышленности — в 2 раза.

Одна из многочисленных причин такого положения состоит в слабом использовании существующей и недостаточной разработке новых методологий обеспечения высокого качества наукоемкой продукции. Рассмотрим основные направления таких методологий.

Построение математических моделей, реализуемых с помощью ЭВМ, определяет воздействие математики на прогресс и ускорение его темпов в наукоемкой продукции [28, с. 283]. Особенно значительна эффективность экспериментально-статистической методологии. По мнению проф. Каору Исикава, президента технологического института Мусаи в Токио, специалиста в области разработки и внедрения системы управления качеством в Японии и за рубежом "инженеры, которые дают оценку на основе экспериментальных данных, должны знать статистические методы наизусть" [29, с. 26]. Применение статистических методов в управлении качеством и его контроле, при анализе качества и технологических процессов было положено в основу создания высокого уровня технологии и ее экспорта [29, с. 27; 30; 31]. Высокий уровень технологии не возможен без использования статистических методов.

Опыт отечественных работ показал, что использование методологии планирования эксперимента повышает эффективность (за счет сокращения

затрат и времени) экспериментальных исследований в 2—10 раз [32, с. 4]. При решении задач системных исследований (с числом факторов четыре и более) экономический эффект от использования методологии активного эксперимента может достигать порядка сотен процентов [33, с. 36]. Помимо экономии на проводимых исследованиях, можно получить значительную прибыль от продажи наукоемкой продукции. На мировом рынке 1 кг веса автомобиля оценивается в среднем в 20 долл., бытовой электронной техники — в 100, самолета — около 1000 долл. [34, с. 5].

Другим важным направлением в создании наукоемкой продукции должна стать оптимизация технологических и технических систем. Более двух с половиной веков назад (1728 г.) Леонард Эйлер отмечал важность решения экстремальных задач. Одним из первых математиков, сформулировавших решение задачи оптимизации для технической системы, был П.Л. Чебышев. На основе идеи оптимизации он сформулировал подход в решении разнообразных прикладных задач и считал его важнейшим для всей практической деятельности человека [35, с. 239].

Проф. А.А. Маталин оптимизацию режимов и процессов обработки относит к важнейшим современным направлениям развития технологии машиностроения. В значительной мере она основывается на достижениях математических наук, электронной вычислительной и управляющей техники, кибернетики [36, с. 10].

По мнению акад. И.И. Артоболевского, необходима разработка методов математического описания и моделирования объектов технологии и вариантов автоматизации, методики оптимального решения основных задач синтеза схем машин — автоматов и автоматических линий [37, с. 2].

Оптимизация необходима и в вопросах технологичности конструкции. К факторам, определяющим технологичность конструкции, относятся: оптимальные формы деталей, наименьшие масса изделия, количество наименований материалов, применяемых в конструкции изделия, и др. Управление процессом токарной обработки сводится к поиску и поддержанию оптимальных режимов работы станка [38, с. 266]. В общем случае эффективность производственных процессов в значительной мере зависит от управления технологией и производством. При этом задача оптимального управления технологическими процессами становится важнейшей [39, с. 39—40; 40, с. 42—44; 41, с. 11—12; 42, с. 51—53].

Кроме обеспечения высокого качества наукоемкой продукции, многофакторное математическое моделирование представляет по заключению проф. В.С. Корсакова "одно из главных направлений дальнейшего развития технологии машиностроения — выявление закономерностей протекания технологических процессов и получение соответствующих математических зависимостей для выполнения точных технологических расчетов" [43, с. 413].

1.4 Существующая методология получения научной информации о технологических системах

По мнению некоторых зарубежных исследователей в области технологии машиностроения, обработки металлов резанием, несмотря на огромное количество проведенных научных исследований, использование полученного научного фундамента неудовлетворительно, т.к. объективно и научно обоснованно нельзя решить типичные технологические задачи [44, с. 5].

На данном этапе развития методологии проведения научных исследований известны следующие основные методологические подходы получения новой информации в технологических и технических областях деятельности исследователя: теоретико-аналитический, экспериментально-статистический, вычислительный эксперимент, эвристический. Каждый подход характеризуется условиями возникновения, историей развития, преимуществами и недостатками, областями возможного применения и другими важнейшими свойствами. В зависимости от предметной области и решаемых задач следует использовать тот или иной подход. Необходимо проанализировать подходы и определить возможности каждого из них по отношению к технологическим и техническим системам.

Выработанное наукой теоретическое представление о познании является обобщением опыта развития познания к рассматриваемому моменту истории. "Теоретическое мышление каждой эпохи — это исторический продукт, принимающий в различные времена очень различные формы и вместе с тем очень различное содержание" [45, с. 366].

Основная особенность теоретико-аналитического подхода заключается в том, что его применение к реальной действительности требует определенного абстрагирования от многообразия свойств, сторон или связей реальной действительности. Оно может настолько изменить свойства моделируемой действительности, что полученные результаты не будут отражать целей, для которых задача была решена. Указанная особенность представляет существенную составную часть теоретико-аналитического подхода и отражает противоречие между возможностями используемого метода решения задачи и реальными свойствами действительности.

Использование теоретико-аналитического подхода предполагает полное знание, а, следовательно, определенность свойств и поведения реальной действительности. По мере возрастания сложности моделируемой действительности такое знание практически становится невозможным.

При анализе связи теории с практикой в обработке металлов резанием группа авторов обращает внимание на то, что теоретические исследования могут производиться в условиях, существенно отличающихся от практических, когда одновременно действует большое число факторов, трудно поддающихся анализу. Однако требование практического использования результатов теоретических исследований прежде всего предопределяет не-

обходимость учета влияния всех факторов, имеющих практическое значение. При этом важную роль играет "правильный учет взаимодействия факторов" [46, с. 392].

Проф. А.И. Сидоров отмечает [47], что такие разделы изучения машины, как кинематика и динамика, имеющие ярко выраженный теоретический характер, не изучают точно явлений, происходящих в действительной машине. Они приближительны и их выводы относятся не к реальным машинам, а к воображаемым, упрощенным [47, с. 10]. Степень соответствия теоретической схемы реальной машине зависит от уровня идеализации действительности и уровня абстрагирования.

Специалисты в области прикладных систем (системной практики) проф. Т.А. Коуэн, проф. Ф.И. Перегудов обращают внимание на медлительность, постоянное отставание и большей частью не соответствие теории с практикой. "Практика бесконечно более сложна, чем теория, предназначенная для ее отображения. Популярное представление, будто высший порядок человеческой деятельности связан с теорией, а не с практикой и опытом, является предубеждением со времен греческой античности, постоянно подвергаемым сомнению и столь же регулярно подтверждаемым" [48, с. 145].

Теоретические построения представляют собой формальную систему, т.е. совокупность абстрактных понятий, не связанных с реальным миром. В них представлены правила преобразований со множеством символов, которым даны определения. Преобразование символов проводят в синтаксической интерпретации без учета прикладного (иначе смыслового) содержания.

Попытки решить задачи трения твердых тел, возникающие при обработке деталей машин, с позиций теоретической физики не дали ощутимых инженерных результатов. Проф. А.А. Силин указывает на чрезвычайную сложность и многообразность процессов в реальных машинах, не поддающихся физическому моделированию. Описание зачастую проводят придуманными моделями, искусственно рассекая, произвольно формулируя и сильно упрощая реальную физическую действительность [49, с. 26].

Другая причина типичных трудностей при использовании теоретико-аналитического подхода связана с нелинейностью решаемых задач.

Акад. А.А. Самарский считает, что "аналитические методы здесь уже, как правило, не работают. Решенные аналитически до конца серьезные нелинейные проблемы насчитываются единицами... Вычислительный эксперимент становится сейчас практически единственным средством проведения теоретических исследований в прикладных задачах" [50, с. 39].

Акад. Я.З. Цыпкин также отмечает пригодность аналитических методов для решения относительно простых задач, полученных благодаря далеко идущей идеализации, в результате которой решается не поставленная, а совсем иная задача [51, с. 23].

Использование теоретико-аналитического подхода желательно, так как "нет ничего практичнее хорошей теории". Однако практика его применения

указывает на возможность адекватного описания только для простейших моделей. "...Значение аналитических методов в инженерной практике сильно ограничивается. В то же время аналитическая форма является основной при изложении и развитии математического аппарата в общем виде" [52, с. 15]. Последнее положение послужило причиной желаний многих исследователей получить формализованное описание реальной действительности в аналитическом виде на основе вскрытия механизмов происходящих явлений. Несомнимость возможностей аналитического подхода и свойств технологической системы накладывает ограничение на получение такого описания с необходимыми для прикладного использования критериями качества.

В практике проведения прикладных исследований значительное распространение получил экспериментально-статистический подход. Исследования, проведенные в 500 крупнейших фирмах США, показали, что 98,4 % фирм эпизодически или постоянно применяют методы математико-статистического анализа. 87,1 % фирм полагает, что затраты на их применение окупаются полученными доходами [53, с. 8—9].

Значительная часть прикладных процессов настолько сложна, что при современном состоянии теоретико-аналитических методов редко удается создать их универсальную теорию. Акад. М.А. Лаврентьев считал, что вместо этого нужно посредством экспериментов выделить ведущие факторы в целях управления процессом [54, с. 7—8].

В технологических исследованиях, контроле качества продукции экспериментально-статистический подход нашел значительные области применения. Причины этого состоят в том, что возможности теоретико-аналитического подхода для системных технологических задач весьма ограничены по количеству факторов, критериев качества, затратам времени и интеллектуального ресурса. Полученные исходные данные содержат случайные ошибки и использование статистической методологии становится необходимым.

Очень часто зависимость, которая существует объективно, не имеет известного описания в виде математической формулы. Такая зависимость может быть получена статистическими методами после проведения с системой (объектом) необходимых экспериментов.

Кроме экспериментальных исходными данными могут быть результаты статистических испытаний, счета на ЭВМ, экспертные оценки. Поэтому современное понимание эксперимента шире и глубже традиционного. Лауреат Нобелевской премии проф. И.Р. Пригожин считает, что мысленный эксперимент как разновидность экспериментальной процедуры является орудием чисто теоретического анализа [55, с. 87].

Современная методология экспериментально-статистического подхода в сложных управляемых экспериментах включает в себя важнейшие методологические понятия кибернетического подхода и планирования (конструирования) эксперимента.

Кибернетический подход в экспериментировании представляет объект экспериментирования в виде модели "черного ящика". Внутреннее устройство, структура, характер связей отдельных частей (подсистем) в полной или значительной степени не ясны. Многофакторное математическое моделирование позволяет получить модель системы и установить структурную связь факторов, направление и силу их влияния на изучаемый критерий качества. Для выполнения таких целей математическая модель должна отвечать некоторым критериям качества. Теория и практика математического моделирования показывают, что модель будет соответствовать необходимым критериям качества только при планировании проводимого эксперимента.

Планирование позволяет (в случае линейной модели относительно независимых параметров) получить значительную информацию о ее свойствах до начала проведения эксперимента, максимально возможную информацию из исходных данных при определенных затратах на проведенный эксперимент, а также избежать решения некорректно поставленных задач и в значительной степени формализовать постановку и проведение эксперимента, обработку и интерпретацию полученной информации. Возможно изменение мнения о том, что экспериментальный метод является искусством и что в основе его лежат особые навыки и умения [55, с. 86].

Существующие методы планирования эксперимента следует развивать и дополнять новыми решениями. Необходима разработка методологии конструирования робастного (устойчивого) плана эксперимента по отношению к различным структурам многофакторных уравнений регрессии (многокритериальное описание) и технологии формирования устойчивой структуры многофакторного уравнения регрессии произвольной конечной сложности.

Для типичной технологической ситуации мультиколлинеарности факторов необходимо разработать алгоритмы устойчивой оценки коэффициентов уравнения регрессии. Следует также разработать и проверить на реальных задачах технологию получения многофакторных математических моделей технологических систем, отличительной особенностью которых является получение семантических (в информационном смысле), адекватных, информативных, устойчивых и эффективных математических моделей.

Практическое воплощение в реальность указанных разработок обусловливает создание программного средства, позволяющего реализовать сквозную автоматизированную технологию обработки данных в виде решения задач многокритериальной оптимизации, многофакторного математического моделирования, проведения вычислительного эксперимента.

Внедрение в практику использования разработок требует решения на потоке различных задач по технологическим, измерительным, материаловедческим системам и уточнения, отладки принимаемых решений.

Свойства технологических систем таковы, что использование статистических методов исследования неизбежно. На это указывал еще проф. А.П. Соколовский [56, с. 238].

Статистические методы непосредственно связаны с практикой производства. Встречающиеся противопоставления двух подходов — теоретико-аналитического и экспериментально-статистического — не конструктивны. Каждый из подходов должен быть применен при решении таких задач и проблем, чтобы практическое использование решения давало бы пользу для производства и науки.

На примерах использования в Японии, США экспериментально-статистических методов для всеобщего улучшения качества продукции видно, что это дало миллиардные прибыли и оказало серьезное влияние на феномен японского научно-технического прогресса. В их реализацию уже втянуты миллионы людей в разных странах мира [57, с. 3].

Почетный член Лондонского Королевского статистического общества проф. А.А. Чупров в начале нашего века отметил "стремление научного знания облекаться в статистические формы... И скоро не будет той ветви знания, куда с большим или меньшим успехом не простирали бы своего влияния статистические формы знания" [58, с. 127—128].

Мы должны быть не только свидетелями этого процесса, но и участниками его.

Значительное развитие математического моделирования и вычислительной техники позволило реализовать новый подход в получении научно обоснованной информации — вычислительный эксперимент. Он представляет собой систему целенаправленных действий с объектом исследования (в физическом понимании), полученную после изучения его математической модели (или моделей), алгоритм анализа и действий с математической моделью, необходимого для этого программного обеспечения и анализа результатов экспериментирования с моделью (или моделями). Центральной частью вычислительного эксперимента представляется модель — алгоритм — программа. Вычислительный эксперимент рассматривается учеными как новая технология производства знания (информации) [59, с. 4].

Области применения вычислительного эксперимента весьма разнообразны и характеризуются сложностью, системностью, относительно малой изученностью исследуемых систем и объектов, трудностью и дороговизной проведения эксперимента с физическими объектами.

Имеются примеры перспективного применения вычислительного эксперимента в решении технологических задач, в средствах измерения и измерительно-информационных системах.

Ранее отмечался нелинейный характер многих теоретических задач в технологических исследованиях. Вычислительный эксперимент заменяет здесь теоретико-аналитический подход. Используя его, можно проводить изучение протекания механизмов, происходящих в технологических процессах явлений, прогнозировать поведение технологической системы. Это будет способствовать развитию вычислительного эксперимента в прикладных технологических исследованиях.

Рассмотренные подходы представляют собой формальные методы получения и преобразования информации. Однако, их использование еще недостаточно для получения новых технических и технологических решений, особенно на уровне изобретений. Даже в математике применение эвристического подхода необходимо. Проф. М.Б. Малютков обращает внимание на то, что выбор наилучшего подмножества регрессоров — трудная проблема, имеющая огромное прикладное значение. Для ее решения используются различные эвристические методы [60, с. 6].

Под эвристическим методом будем понимать последовательность предписаний или процедур обработки информации, выполняемую с целью поиска более рациональных или принципиально новых технических решений. Использование эвристических методов целесообразно, в тех случаях, когда другие математические методы оказываются менее эффективными.

Эвристический подход обычно используется для решения так называемых плохо определенных задач в противоположность хорошо определенным. Эвристики сокращают время решения задач по сравнению с полным ненаправленным перебором возможных альтернатив. Однако применение эвристического подхода не гарантирует полного и исчерпывающего решения задачи.

В [61, с. 30] приводится яркий пример понятия неформальных технологических решений образования сквозного продольного канала в прутке из металла длиной 1 м и диаметром 1 мм, т.е. $L/D=1000$, методом резания. Отношение длины прутка к диаметру отверстия составило ≈ 3000 . Решение аналогичных технических и технологических задач формальными методами практически невозможно. Однако в реальной действительности такие задачи решают на основе прошлого опыта, интуитивных соображений, а главное, эвристических приемов решения задач. Эвристические методы используются как методы поиска новых технологических решений, методы активизации творческой деятельности инженера, ученого. В 1980 г. впервые в СССР в технических вузах Украины началось чтение курса лекций "Основы технического творчества".

Существует несколько десятков эвристических методов поиска новых технических решений. Наиболее известны из них алгоритм решения изобретательских задач и вытекающая из него теория решения изобретательских задач Г. Альтшуллера, обобщенный эвристический алгоритм А.И. Половинкина, метод гирлянд случайностей и ассоциаций Г. Буша, метод контрольных вопросов Т. Эйлоарта, морфологический анализ Ф. Цвикки, синектика В. Гордона, метод мозгового штурма А. Осборна, метод фокальных объектов Ч. Вайтинга.

Эвристические рекомендации используются в вычислительной математике (часто под названием "маленькие хитрости"), прикладной статистике, планировании эксперимента. Причины такого положения следует видеть в невозможности полного абстрагирования при решении прикладной задачи,

трудности формализации некоторых сторон (свойств) реальной действительности. Проф. А.И. Сидоров указывает на невозможность или страшную сложность получения уравнений, описывающих оптимальную деталь [47, с. 385—386].

Аналогичная проблема возникает и в системных задачах. В создании (синтезе) оптимальных прикладных систем кроме формальных математических и вычислительных методов "большую роль... играют разнообразные эвристические соображения, впитавшие в себя огромный опыт, интуицию и глубокое понимание содержания предмета, которые сегодня есть у инженеров. Математик с его традиционной манерой мышления часто оказывается бессилем там, где инженер получает результаты, вполне удовлетворяющие практику" [62, с. 7].

Древняя восточная мудрость, приписываемая Конфуцию, гласит: "Три пути ведут к знанию: путь размышления — самый благородный, путь подражания — самый легкий и путь опыта — это путь самый горький."

Выбор того или иного подхода при решении технологических задач зависит от системных свойств моделируемого объекта, процесса; поставленных целей и уровня абстрактности полученного решения задачи; ресурсов, отпущенных на решение; уровня знаний и опыта тех, кто решает задачу.

Информационные свойства основных рассмотренных подходов получения технологических решений (в виде результатов экспертной оценки) приведены в табл. 1.1.

Анализ методологии и многолетняя практика показывают, что применительно к технологическим и техническим системам наиболее эффективны вычислительный эксперимент, экспериментально-статистический и эвристический подходы. Однако, правильному выбору метода исследований могут мешать и предубеждения специалиста [63].

1.5 Номографический и идиографический подходы в описании объектов реальной действительности

Кроме выбора конкретной методологии получения научной информации исследователь (сознает он это или нет) должен выбрать (или в неявном виде использовать) один из общесистемных принципов проведения исследований. Такими общесистемными подходами могут быть номографический и идиографический [64].

Формирование общесистемного подхода (иначе парадигмы) к изучению реальной действительности было начато в работах древнегреческих философов Аристотеля и Платона.

Наиболее раннее описание физических понятий относится к IV веку до н.э.. Изложение было следствием размышлений и логических заключений. Некоторые утверждения не были основаны на наблюдениях и, тем более,

Таблица 1.1 Информационные свойства основных методов получения научно-технической информации

Основные критерии качества методов получения информации	Методы				
	теоретико-аналитический	экспериментально-статистический	вычислительный эксперимент	эвристический	поиск существующих решений
Возможность решения сложных задач и проблем	П/4	Х/1-2	Х/1-2	У/3	П/5
Эффективность полученных приемлемых для практики решений	У/3-4	В/1-2	В/1-2	У/3-4	П/5
Доступность решения для инженерно-технического персонала	П/5	У/2-3	П/4	У/2-3	Х/1
Затраты времени, необходимые для получения решений	Б/5	С/2-3	М/1	Б/4	С/2-3
Надежность полученных приемлемых решений	У/3	В/1-2	В/1-2	У/4	Н/5
Возможность получения количественных решений	У/3	Х/1-2	Х/1-2	П/5	П/4
Уровень формализованного получения решений	С/3	В/1-2	В/1-2	С/4	Н/5

Условные обозначения:

В – высокая(-ий); Х – хорошая; М – малые;

С – средняя (-ий); У – удовлетворительная;

Н – низкая(-ий); П – плохая; Б – большие.

Рейтинг среди пяти основных подходов:

1-й – лучший; 2-й – хороший; 3-й – удовлетворительный;

4-й – неудовлетворительный; 5-й – худший.

поставленных экспериментах. Конкретная практика в это время была уделом рабов. Аристотелева физика в течение 20 веков не подверглась изменениям. Только после опытов Галилея были внесены изменения в гипотетические представления о реальности, и физика приблизилась к подлинной науке.

Древнегреческий философ Платон предложил рассматривать не реальные явления и физические тела, а их идеальные копии. Платон относился к философам-идеалистам и считал реальные явления и физические тела лишь несовершенными копиями тех понятий и образов, которые необходимо изучать. Платон считал сущим идею, а не материю, так как последняя лишь частично вмещает идею, подражает идеальному бытию, которое независимо от материи существует само по себе.

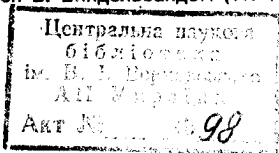
Изложенная система взглядов на методологию изучения реальной действительности просуществовала столетия. Она сыграла выдающееся значение в формировании понятия "идеальное", которое естественной составной частью вошло в математику и во многие теоретические проблемы физики, механики и других наук. С развитием тепловых двигателей, морского и железнодорожного транспорта, промышленного способа производства изделий и товаров возникла острая потребность перейти от идеальных понятий к реальной действительности и дать научно обоснованные рекомендации в описании, прогнозировании поведения, оптимизации реальных объектов техники и технологии без их идеализации в традиционном понимании.

Рассмотрение и анализ различных подходов в изучении реальной действительности провел в начале нашего века чл.-кор. РАН, заведующий кафедрой статистики Петербургского политехнического института проф. А.А. Чупров. Он развил идеи немецкого философа Г. Риккерта о делении всех наук на номографические — объясняющие основные, наиболее общие законы — и идиографические — описывающие закономерности конкретных явлений в детальных условиях * [64].

Констатируя то, что при научном познании происходит систематическая схематизация действительности, А.А. Чупров выдвигает на центральное место в теории науки вопрос о приемах упрощения, при помощи которых она выполняет свои функции [64, с. 39]. Номографические науки упрощают действительность, обобщая, отвлекаясь от деталей и индивидуальных подробностей [64, с. 40]. Однако, номографический подход, порождая "вечные законы", не объясняет конкретные явления реальной действительности [64 с. 51].

Идиографические науки изучают "индивидуальное", "единичное", "конкретное", не отрывая объект изучения от определенных рамок времени

* Выражение "науки номографические" встречается в отчете Л.Кутюра (L. Couturat) о докладе Виндельбанда на II международном философском съезде в Женеве (1904 г.). Термин "идиографический" предложен В. Виндельбандом (W. Windelband), профессором Страсбургского университета.



и места. Они используют для этого методологию статистического описания и формулируют через единичные проявления общие закономерности и законы проведения множества однотипных объектов и явлений, которые в массовых проявлениях становятся случайными, точнее имеют вероятностный характер.

А.А. Чупров отмечает, что "одностороннее увлечение ученого мира номографией и отказ в признании научной равноценности идиографического исследования, хотя и тормозят рост статистической науки и налагают на нее свою печать, заставляя приспособляться к господствующим в науке логическим предрассудкам и облекать идиографическое содержание в мало идущие к нему номографические формы, но не мешают ей донести составляющую ее специфическое содержание систему идиографических знаний до той поры, когда поворот в общей теории науки обеспечивает идиографии дальнейшее свободное развитие" [64, с. 50].

Потребности наукоемкого производства, совершенствование технологии требуют развития идиографических наук, в которых статистическое знание развивается и проявляется через статистические совокупности, выборку и выборочный метод их описания.

В технологических исследованиях, считал проф. А.П. Соколовский, при установлении и использовании понятия "закон" необходимо помнить о схематизации и обеднении явления, невозможности охватить различные стороны свойств явлений; об узости, не полноте, приблизительности закона [56, с. 238].

Формулировка закона, т.е. номографический подход, в технологических исследованиях не дает конкретной информации об изучаемых объектах и процессах. Одна из основных причин этого заключается в том, что при номографическом подходе в сформулированном законе не отражаются свойства исследуемой конкретной системы в явном виде, представление закона происходит весьма приближенно и относится ко всем системам данного класса.

Исследователи отмечают, что прикладные науки и технология обработки резанием имеют свою глубокую специфику [20]. Для раскрытия закономерностей реального процесса недостаточно изучения только механических, физических и других явлений, происходящих в этом процессе, каждое изолировано от других. "Столь же необходимо установить, в каких взаимосвязях все эти явления находятся, как они влияют друг на друга, когда совершаются одновременно" [20, с. 5]. Системное описание должно быть нормой для идиографического подхода. В математическом моделировании оно раскрывается через компоненты математической модели в виде взаимодействий факторов. Модели, линейные относительно независимых параметров, позволяют в естественном виде и наглядно представить взаимодействия различных факторов и описать структуру процесса или системы.

По мнению акад. К.В. Фролова, для улучшения технических решений знание только общих законов природы недостаточно. Необходим анализ

математическими средствами построенных математических моделей машин, процессов с целью управления их качеством и создания научных основ проектирования в технике [65, с. 3]. Переход от общих — номографических законов к математическим моделям — идиографическим закономерностям и законам реальных машин, процессов представляет объективную необходимость проникновения в сущности более высокого порядка.

Рассматривая проблематику номографического и идиографического подходов в науке, мы должны обратить внимание еще на один ее аспект. В номографическом подходе проблема считается решенной, если разработаны алгоритм, методика, сформулированы основные положения по ее реализации. Однако для решения прикладной задачи этого недостаточно. Еще Стендаль (А.М. Бейль) отмечал: "Для применения на практике мысли, вычитанной из книги, иногда надо обладать не меньшей изобретательностью, чем автор этой мысли". Необходимо знать не только карту пути, но и уметь пройти этот путь самостоятельно.

1.6 Современная методология проведения экспериментальных научных исследований — основной подход в получении технологической и технической информации. Неформализуемая информация

При решении системных прикладных задач выбор метода подчинен задачам. Применение только математического подхода маловероятно. Обычно используют экспериментально—статистический и эвристический подходы, а также вычислительный эксперимент. Из указанных подходов экспериментально—статистический является основным.

Многие зарубежные фирмы, особенно в Японии и США, весьма активно используют современные экспериментально—статистические методы (и их разновидность под названием методы Тагути) в ежедневной практике проведения исследований и даже выпуска готовой продукции. Так фирма Nippondenso только в 1986 г. на практике 3000 раз воспользовалась указанными методами (каждый рабочий день решалось 10—12 задач). На американских фирмах за 6 лет эти методы применялись 6000 раз. Фирма Nippondenso использовала экспериментально—статистические методы порядка 30000 раз. Около 15 % инженерного состава компании можно считать специалистами по этим методам; еще 30 % весьма компетентными в этой области [66, с. 13].

Для улучшения качества продукции экспериментально—статистические методы используются в Японии более четверти века. Только в 1987 г. эти методы применяли 1 млн. раз. При этом экономический эффект составил не менее 7 млрд. долл.. С 1981 г. они во все более расширяющихся масштабах используются в США, с 1988 г. — в Канаде, Западной Европе [67, с. 45].

Успех в использовании экспериментально-статистических методов зависит от тщательной проработки методологии проведения исследований, системного конструирования их информационной эффективности. Американский ученый в области теории прочности материалов Ф. Дж. Белл считает, что экспериментальные исследования должны быть четко поставлены, точно осуществлены и задуманы системно, иначе работа будет низведена до уровня не имеющих смысла догадок [68, с. 290].

Основной принцип получения математических моделей в экспериментально-статистическом подходе — аппроксимация неизвестных (в оригинале) зависимостей другими, близкими к ним и более простыми и удобными в использовании зависимостями. Основные особенности научной аппроксимации — модельность, оптимальность, строгость. И в методологическом, и в философском смысле разработка более обоснованных и строгих методов аппроксимации — генеральное направление развития научной мысли в ближайшем будущем [69, с. 35—37].

Учитывая основополагающую роль эксперимента при изучении технологических систем, полезно проанализировать его с неформальных позиций. Любой эксперимент предполагает проведение определенных действий и получение ответа на проведенные действия в виде полученной информации. А. Розенблют и Н. Винер, анализируя роль моделей в науке, рассматривали постановку эксперимента как задание определенного вопроса. "Любой эксперимент — всегда некий вопрос. Если вопрос неточен, получить точный ответ на него трудно. Глупые ответы, т.е. противоречивые, расходящиеся друг с другом или не относящиеся к делу иррелевантные (неуместные — P.C.) результаты экспериментов, обычно указывают на то, что сам вопрос был поставлен глупо" [18, с. 171].

Значительно раньше, рассматривая общую проблематику постановки вопроса и получения на него ответа, И. Кант заключал: "Умение ставить разумные вопросы есть уже важный и необходимый признак ума или проницательности. Если вопрос сам по себе бессмыслен и требует бесполезных ответов, то кроме стыда для вопрошающего он имеет иногда еще тот недостаток, что побуждает неосмотрительного слушателя к нелепым ответам и создает смешное зрелище: один (по выражению древних) доит козла, а другой держит под ним решето" [70, с. 159].

Приведенные неформальные понятия можно интерпретировать и в специальных терминах. Не оптимально поставленному эксперименту (особенно в многофакторном случае) соответствует некорректно поставленная задача и, как следствие, плохо обусловленная система нормальных уравнений метода наименьших квадратов. Постановка многофакторного эксперимента без соблюдения специальной методологии еще более усложняет (затрудняет) получение правильного ответа в виде многофакторной математической модели. Использование различных алгоритмов и программного обеспечения обработки результатов не может существенно улучшить полу-

чаемые результаты, так как не устраняет исходные свойства плохо поставленного эксперимента (вопроса).

В прикладной деятельности инженера в области технологических систем практически не представляется возможным полностью формализовать все необходимые действия. Возникает проблема принятия решения в условиях неформализуемой исходной информации. Неформализуемая информация связана со знаниями, опытом, навыками работающего специалиста в конкретной предметной области.

По мнению акад. В.В. Новожилова, подавляющее большинство актуальных задач в физике и технике не поддается строгому решению, т.е. формальным доступным методам, которыми пользуется математик-теоретик. Попытки использования ЭВМ показали, что они не безразличны к выбору алгоритма и математическая безупречность еще не гарантирует его приемлемости для ЭВМ. Специалист-прикладник должен обладать развитыми специальными знаниями и практическими навыками [71, с. 41], что и восполняет неформализуемую информацию.

Кроме строго формальных методов, получение математических моделей реальных систем требует информации, которую невозможно формализовать. Интуиция, опыт прошлого имеют важнейшее значение в процессе построения модели. Поэтому написать учебник по построению моделей невозможно, но можно выявить определенные принципы [72, с. 84].

1.7 Возрастание роли экспериментальных, вычислительных, кибернетических методологий в получении технологической информации

Экспериментальные методы исследований играют выдающуюся роль в успехах новейшего естествознания и технических областях. Создание и широкое использование новых экспериментальных методов научных исследований "стало ныне полем соревнования и соперничества передовых стран и наций всего мира. ...проблема уровня эксперимента вырастает ныне до национальной задачи, так как определяет научно-технический потенциал страны" [73, с. 2].

Экспериментальные методы исследований должны применяться не только в исследовательских лабораториях, но и непосредственно в промышленности. Новый подход к получению информации основан на утверждении, что каждый промышленный процесс должен давать не только товарную продукцию, но и информацию [74, с. 2]. Сформулирован он был в конце 60-х годов, однако в нашей промышленности существенного распространения не получил. А между тем, по оценкам экспертов, каждый рубль, вложенный в эксперимент и разработку, обеспечивает прирост национального дохода примерно в 4 раза по сравнению с соответствующим показателем общей эффективности планового расширения производственных фондов [75, с. 4].

В отличие от теоретических областей и чистой математики в технологических исследованиях требования срочности, обоснованности и обязательности получения решения выдвигаются на первый план и экспериментальный подход становится основным.

В соперничестве человеческого интеллекта за получение ответа природы на предложенный ей вопрос квалифицированно поставленный эксперимент способен привести к результатам, превосходящим умозрения даже крупнейшего мыслителя [76].

Обработка результатов экспериментов, получение математических моделей, поиск оптимальных условий требуют использования ЭВМ и вычислительных методов. Практика показывает, что в большинстве стран получение моделей методологией вычислительного эксперимента — серьезное научное направление [77], развиваемое за счет государства и частного бизнеса.

Методологической основой изменения в технике и технологии производства, по мнению акад. А.А. Самарского, необходимо считать математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Их развитие должно осуществляться темпами, опережающими развитие материального производства. Доступные и экономные информационные технологии создаются за счет их использования [17, с. 25].

Возрастание сложности решаемых задач и попытки их системного решения стимулировали использование кибернетической методологии и кибернетического моделирования. Кибернетическое моделирование представляет систему в виде модели "черный ящик", фиксирует входы и выходы системы в виде матриц исходного и конечного состояний системы и аппроксимирует полученные экспериментальные результаты определенной формальной структурой математической модели. Кибернетическое моделирование строится не в терминах причинного объяснения, а в терминах функциональных связей системы входов и выходов моделируемой системы.

Высокая эффективность использования кибернетической методологии заключается в возможности математического моделирования сложных систем "... даже тогда, когда сложность достигает уровня неопределенности" [63, с. 132]. Кибернетическая методология позволяет работать с реальными системами, не подменяя их удобными абстракциями. Она не отбрасывает изменчивость и неопределенность в поведении системы и тем самым не лишает систему ее основных свойств. По мнению акад. Г.Н. Флёрова, переход от аналитического описания процессов к их моделированию означает качественно новую ступень развития науки [78, с. 80]. Отдельные части математического процесса моделирования могут выбираться непосредственно из опытов и представлять собой "черные ящики".

Использование кибернетической методологии в технологических исследованиях необходимо рассматривать как оптимизацию трудовых, временных, энергетических, сырьевых, информационных ресурсов. Важно, что та-

кой принципиальный подход в практической деятельности дает реальную возможность фактически получить оптимальные решения.

1.8 Теория планирования эксперимента, вычислительный эксперимент — современная методология проведения экспериментальных научных исследований

В 30-х годах нашего столетия усилиями английского математика-статистика Р.А. Фишера и его коллег возникло новое направление в прикладной статистике, получившее название теории планирования эксперимента.

Теория планирования эксперимента — раздел прикладной статистики, системно изучающий оптимальные схемы постановки, проведения комплексных многофакторных экспериментальных исследований сложных объектов, процессов, систем, а также обработку и интерпретацию полученных результатов [79].

Появление после 1923 г. ряда статей Р.А. Фишера изменило традиционное представление о роли статистических методов в проведении экспериментальных исследований. Ранее считалось, что их роль состоит лишь в анализе экспериментальных данных. Теория планирования эксперимента позволяет конструировать эксперимент, управлять им, получить полезную информацию и придать ей необходимые свойства. Эффективность извлечения полезной информации из исходных данных при получении многофакторных математических моделей, если использовать многофакторные регулярные планы, обычно близка (более 85 %) или равна 100 % от возможного максимума и, следовательно, использование ресурсов для получения этой информации наилучшее.

Принципиальные преимущества, которые обеспечивает теория планирования эксперимента при проведении экспериментальных исследований, еще не осознаны в должной степени. Обработка первичных данных, полученных функционированием системы в своем естественном режиме, не позволяет получить ту же информацию, что и при активном эксперименте [18, с. 134]. Даже повышение объема исходных данных на два-три порядка больше, чем в случае планирования эксперимента [18, с. 134], не только не улучшает свойства получаемой информации, но может существенно ухудшить ее за счет закоррелированности результатов между собой [80, с. 89—99]. Специалисты в области теории планирования эксперимента считают, что любой эксперимент должен быть поставлен с учетом рекомендаций математической теории эксперимента [81, с. 53].

Проф. М.И. Клушин видел необходимость "...расширить использование идей и методов современной математической теории планирования многофакторного эксперимента, творчески осмысливая их с учетом специфики изучаемого объекта" для решения основной задачи теории обработки реза-

нием: "разработки математических моделей как отдельных частных закономерностей, так и в целом всей системы резания" [20, с. 8].

Проф. Л.И. Волчкевич считает, что "современный инженер-машиностроитель ... обязан владеть в первую очередь математическими основами эксперимента ..., таким ее разделом, как теория оптимального эксперимента..." [82, с. 22-23].

Проф. А.Н. Гаврилов отмечал, что в теории точности производства широко используются статистические методы. "К перспективным методам, еще не нашедшим широкого распространения, следует отнести, кроме перечисленных, дисперсионный анализ, теорию планирования эксперимента и др." [38, с. 123].

Из приведенного можно заключить, что проведение эксперимента с технологической системой и его оптимальное конструирование является эффективным и надежным средством для получения необходимой информации об этой системе [83; 84, с. 116-124; 85, с. 81-87].

В теории планирования эксперимента возможны различные постановки задач. В терминах "информация - затраты" они могут быть разбиты на две группы: получение максимума информации при допустимых затратах на эксперимент и минимизация затрат при заданной сложности получаемой математической модели (или математических моделей). Эффективность использования методов теории планирования эксперимента весьма высока. По данным д.т.н. В.В. Налимова при лучших по сравнению с традиционными методами результатах время, необходимое для проведения исследований, сокращается в 8-12 раз [86, с. 8].

Задачи, решаемые по технологическим системам, как правило, нелинейны, что создает значительные трудности их аналитического исследования. Полученные математические модели следует использовать в математическом эксперименте в целях проведения теоретического анализа изучаемой системы. При реализации экспериментального и вычислительного методов возникает задача нахождения компромисса между желательным и возможным числом экспериментов или узлов сетки, в которых необходимо знать численные результаты. Это - достаточно серьезная проблема [50, с. 51], не имеющая теоретического решения.

Традиционные физические, математические, инженерные методы получения научно обоснованной информации сформировались в классический период развития науки. С этим периодом связано использование теоретико-аналитического подхода как основной научной концепции получения информации. Для него характерно отсутствие или недостаточно широкое использование электронно-вычислительной техники, сравнительно слабые требования к системности, точности математического описания, особенно реальных технологических систем, а не отдельных физических процессов, происходящих в них.

Получение надежных количественных системных результатов в прикладных исследованиях логично связывать с использованием экспериментально-статистического подхода, его оптимального конструирования методами теории планирования эксперимента и проведения с полученными математическими моделями вычислительного эксперимента.

1.9 Существующие методы математического моделирования технологических систем, их критический анализ

Первые исследования в области резания металлов в России были проведены проф. И.А. Тиме (1868 — 1870 гг.). Мы вправе считать его основоположником науки о резании металлов. В 1883 г. проф. П.А. Афанасьев и в 1893 г. проф. К.А. Зворыкин провели интересные исследования и развили основы теории резания металлов.

В 1880 — 1906 гг. большой объем исследований провел американский инженер, специалист в области организации и нормирования труда Ф.У. Тейлор. Впервые в мире он получил формулы (математические модели), показывающие влияние различных факторов — условий обработки на скорость резания [87, с. 76—83; 88, с. 37, 79—89, 218—226]. Главная цель исследований была прикладной: "произвести в механической мастерской наиболее дешевым способом возможно большее количество работы лучшего качества" [88, с. 36].

Ф.У. Тейлор многократно обращает внимание на сложности получения математических моделей. При анализе основной работы "Искусство резать металлы" не было обнаружено использование статистических методов. Методика выбора структуры формул не приводится [88, с. 218].

Вывод: Ф.У. Тейлору необходимо было проявить искусство не только в проведении исследований по резанию металлов, но и в получении формул. Последующие исследователи использовали предложенный Ф.У. Тейлором степенной вид формул и были вынуждены разрабатывать методологию получения самих моделей, описывающих работу технологических систем.

В 1940 г. профессор кафедры металлофизики Сибирского физико-технического института В.Д. Кузнецов поставил проблему создания физической теории резания металлов [89, с. 4]. Он подверг критике использование в качестве математических моделей эмпирических формул степенного вида $y = ax^z$ [89, с. 14, 16], предложенных в рассмотренной работе Ф.У. Тейлора [88]. После принятия указанного решения прошло сравнительно много времени. Физические основы резания металлов были описаны во многих исследованиях. Однако утверждать, что теория резания металлов создана, было бы преждевременным. Такой итог свидетельствует о значительной сложности, комплексности процессов и объектов, которые было предложено описывать с позиций вскрытия механизмов происходящих явлений.

В 1954 г. проф. С.С. Рудник на совещании ученых с новаторами производства отмечал, что нет достаточно надежных и удобных расчетных теоретических формул усилия и скорости резания и приходится пользоваться формулами, полученными экспериментальным путем [90, с. 684].

Ранее в исследованиях при получении математических моделей путем проведения экспериментов с объектами и процессами был широко использован метод однофакторного эксперимента. В работах Г.С. Ома [91, с. 46], Дж. Клейнена [92, с. 9], акад. А.Н. Крылова [93, с. 334] встречаем рекомендации и упоминания об использовании так называемого метода *caeteris paribus*, т.е. изменять факторы по одному при прочих равных (условиях).

В технологических исследованиях по обработке металлов резанием методологию однофакторного эксперимента предложил Ф.У. Тейлор. Анализируя опыты, проведенные и опубликованные д-ром Никольсоном в 1904 г., Ф.У. Тейлор справедливо указывал на ошибку в представлении площади сечения стружки как одного, а не двух факторов: толщины и ширины стружки [88, с. 19]. Из правильного анализа работы д-ра Никольсона Ф.У. Тейлор делает общий вывод о нерациональности одновременного изменения в опытах более одной переменной [88, с. 20]. Далее Ф.У. Тейлор сформулирует общую методологию производства опытов: "Искусство производства опытов состоит в определении влияния изменений одного элемента при условии, что все остальные элементы остаются постоянными" [88, с. 59].

Лишь по прошествии примерно 60 лет после публикации работы Ф.У. Тейлора на смену методологии однофакторного эксперимента в технологии машиностроения пришла методология многофакторного эксперимента.

"Объединение" отдельно полученных однофакторных зависимостей в "многофакторную" модель не позволяет получить действительно многофакторную математическую модель: это нельзя сделать по самой сути изменения только одного фактора при всех постоянных остальных факторах. Вторым недостатком указанного метода является невозможность установления различных взаимодействий факторов.

В учебных пособиях и руководствах по обработке металлов резанием, в технологических исследованиях формулы для расчетов режимов резания определяются на основе экспериментальных исследований [94, с. 181]. Описывая получение зависимости $T=f(v, s, t)$ [94, с. 181, рис. 159] методом однофакторного эксперимента, проф. А.М. Вульф отмечал, что она справедлива, если все факторы не зависят друг от друга, т.е. при отсутствии взаимодействий факторов. В действительности эта зависимость имеет место и формула является приближенной [94, с. 200]. При таком методе получения моделей взаимодействия факторов не включаются в структуру математической модели.

Никто из многочисленных исследователей, изучавших и разрабатывавших методологию получения моделей степенного вида, не отметил еще один недостаток используемой методологии. Для получения искомых коэф-

коэффициентов модели (C_v , m , x_v , y_v и других) общий вид степенной зависимости (нелинейной относительно независимых переменных) логарифмируется. При определении указанных коэффициентов используются не натуральные значения T , v , s , t , а их логарифмы, и минимизируется сумма квадратов отклонений не для исходных натуральных переменных, а для преобразованных значений (логарифмов). Полученные коэффициенты следует рассматривать лишь как приближенные, которые можно уточнить, исключив систематические погрешности. Однако указанного уточнения коэффициентов никто из исследователей не обсуждал и не проводил.

Еще в начале 30-х годов большое внимание исследователей резания металлов было уделено изучению закономерностей изменения показателей степени в формуле $v = C_v / (T^m t^{x_v} s^{y_v})$. В работах И.М. Безпрозванного, К.Е. Зверева, К.И. Жебровского, В.А. Кривоухова, Д.В. Лобанова, С.С. Рудника, Н.И. Резникова было установлено, что показатели степени m , x_v , y_v не являются константами и изменяются не только в зависимости от свойств обрабатываемого (M) и инструментального (I) материалов, но и от различного сочетания значений T (стойкости инструмента), t (глубины резания), s (подачи) [46, с. 246–24]. Причина такого изменения показателей степеней связана со взаимодействием факторов между собой, что указывает на сложный, системный характер влияния важнейших факторов в зависимости $T = f(v, s, t, M, I)$. Несмотря на то, что результаты исследований были доложены на первой Всесоюзной конференции по резанию металлов в 1937 г., только во второй части работы [95] проф. С.М. Ву (S.M. Wu) из Висконсинского университета (США) в начале 60-х годов была использована модель второго порядка, в которой учитывались взаимодействия факторов. Эта работа получила определенную известность, так как была переведена на русский язык. Однако ранее С.М. Ву аналогичные работы по стойкости инструмента провел и опубликовал Н.Б. Колдинг (N.B. Colding) [96, 97].

Проф. А.А. Аваков в 1958–1960 гг. предпринял попытки выявить физические основы теорий стойкости режущих инструментов. Общепринятые правила экспериментального выявления функций типа $T = f(v, s, t, M, P, \dots)$ сводятся к тому, что из всех аргументов искомой функции экспериментальным изменением подвергается лишь один, все остальные аргументы в процессе экспериментирования поддерживаются постоянными [98, с. 5]. Сразу же обращается внимание, что полученная зависимость $T = f(v)$ имеет ограниченную возможность использования при резко отличных от принятых постоянных значениях факторов s , t , M , P [98, с. 5]. Проф. А.А. Аваков указывал на возможный путь решения проблемы, заключающийся во вскрытии всей внутренней совокупности взаимодействующих факторов, от которых зависит стойкость T [98, с. 6]. Однако никакое ее решение он не привел. За почти вековую историю учения о резании металлов были предприняты лишь две попытки общезначимого (не эмпирического) вывода указанной зави-

симости [98, с. 6]. Физический закон резания металлов не был установлен до 1960 г. [98, с. 82].

Проф. В.А. Кривоухов приводит наиболее усовершенствованный вариант метода Ф.У. Тейлора, позволяющий сократить время экспериментирования и все затраты в 2 раза [99, с. 34]. Однако для получения одной зависимости типа $v = f(C_v, T, s, t)$ для токарной обработки необходимо затратить 10 рабочих дней. Методика установления взаимодействий факторов не приводится.

Взаимодействия факторов в получаемых моделях учитывал д.т.н. Н.Н. Зорев.

В работах д.т.н. Н.С. Равской и д.т.н. П.Р. Родина по исследованию процессов обработки металлов резанием и режущего инструмента для прогноза и оптимизации критериев качества процессов используется метод группового учета аргументов (МГУА) и в структуру степенных зависимостей вводятся взаимодействия моделируемых факторов [100, с. 33–36; 101].

Разработка современного информационного обеспечения проектирования, оптимизации, надежности и других проблем создания высококачественного режущего инструмента в Донбасской государственной машиностроительной академии проводится под научным руководством д.т.н. Г.Л. Хаета [102].

В разработку теоретических и прикладных проблем математического моделирования значительный вклад внесли: С.А. Айвазян, Б.М. Базров, Н.А. Бородачев, В.П. Бородюк, Н.П. Бусленко, В.А. Вознесенский, В.Н. Вапник, А.Н. Гаврилов, В.М. Глушков, Е.З. Демиденко, А.Г. Ивахненко, Н.М. Капустин, П.Г. Кацев, А.И. Кухтенко, Ю.В. Линник, В.С. Михалевич, Н.Н. Моисеев, В.В. Налимов, Н.С. Равская, Н.С. Райбман, А.А. Самарский, Л.К. Сизенов, В.И. Скурихин, А.В. Усов, Г.Л. Хает, Т. Андерсон, И.Н. Вучков, Н. Дрейпер, М.Дж. Кендалл, Ф. Мостеллер, И.А. Мюллер, С.Р. Рао, Б. Рёнц, Дж. Себер, Г. Смит, А. Стьюарт, Дж. Тьюки, Э. Фёрстер, П. Эйкхофф и др.

Во всех проанализированных (кроме работ С.М. Ву, Н.Б. Колдинга и Н.С. Равской) и многих других работах по получению математических моделей обработки металлов резанием вопросы проверки адекватности, информативности, устойчивости полученных моделей не рассматривались. Проводимые эксперименты не соответствуют каким-либо критериям эффективности, т.е. методология теории планирования экспериментов не используется. Структура математических моделей не содержит взаимодействий факторов и задается (постулируется) до начала решения задачи.

Ранее было отмечено, что используется нелинейный относительно независимых переменных класс моделей. Построить для таких моделей планы экспериментов, дающие достаточно малую закоррелированность эффектов модели, обычно не представляется возможным. Если такую модель линеаризовать (что практически всегда делают), то корреляция оценок эффектов может доходить до 0,97–0,98 [103, с. 32] и даже до 0,99–0,999 [103, с. 109]. Случайные ошибки в технологических экспериментах при определении стойкостных зависимостей существенны. Значительная закоррелирован-

ность эффектов не позволяет с достаточной для прикладных и научных целей точностью определить коэффициенты математических моделей: доверительные интервалы будут сравнительно велики, а их запись в стандартном виде теряет смысл, поскольку коэффициенты модели существенно закоррелированы. Использование математической модели с такой структурой не может быть успешно осуществлено. Следовательно, выбор структуры математической модели должен позволять реализовать план эксперимента, дающей максимально возможную информацию при фиксированных на него затратах. В противном случае возникает вопрос: зачем необходима такая полученная модель и какой смысл (цель) ее определения?

Успешное решение многочисленных прикладных задач зависит от создания инженерной гносеологии, основанной на экспериментальной информатике и экспериментально-статистических методах многокритериальной поисковой оптимизации и многофакторного математического моделирования. При этом теория и практика получения первичной экспериментальной информации являются для указанной методологии определяющими. Прикладная научная исследовательская система должна органически объединять логико-теоретические и вещественные компоненты познания созданной человеком искусственной среды — технологических и технических систем.

1.10 Основные выводы

Преодоление сложностей, связанных с получением полезной информации о современных системах, ученые видят в изменении самого подхода к исследованию явлений и переосмыслению того, что мы называем "пониманием" какого-либо процесса или явления. "Переход от детального аналитического описания явлений природы к их непосредственному моделированию как основному способу познания будет означать качественно новую ступень развития науки" [78, с. 80].

Исходная информация, полученная из наблюдений и экспериментов в количественном виде, приводит при ее осмысливании к теоретическим гипотезам. Их подтверждение или опровержение формулирует теоретические представления о рассматриваемых системах. Без исходной информации, полученной путем применения экспериментально-статистического подхода, гипотетические представления о технологической системе более вероятно будут фантазией исследователя, а не отображением реальной действительности.

Экспериментально-статистический подход необходим во всех ситуациях прикладных исследований, когда невозможно реализовать изучение подсистемы сложной системы и их элементов, происходящих в них явлений на уровне элементарных понятий, связей, т.е. на динамическом уровне рассмотрения. Сложность проведения системных исследований определяется в большинстве множественным характером причин, которые представляются

количеством факторов, влияющих на критерии качества системы, сложностью влияния каждого фактора и влиянием взаимодействий факторов.

Сформулируем краткие выводы по главе 1.

1. Информационное обеспечение научно-технического прогресса состоит в создании информационных технологий, разработке и реализации наукоемкой продукции. Доля производительных сил в информационном секторе промышленно развитых стран становится преобладающей и достигает в США более 50 %. Экономика Японии к 2000 г. будет переведена на информационную базу. Информация занимает статус национального ресурса и в экономике позволяет сократить затраты любых других ресурсов, фактически заменяя валюту любого наименования.
2. Прибыль от использования информации в 20 раз превышает затраты на ее получение. Эффективность готовой информации от 3 до 25 раз выше других альтернативных принципов деятельности. Прибыль на средства, вложенные в информационную профилактику, от 50 до 7500 раз превышает затраты. Отсутствие или неиспользование необходимой информации приводит к неограниченным потерям любых ресурсов, и в конечном счете к развалу экономики.
3. Ключом к информационным технологиям является эффективная научная методология получения новых научных результатов. Только с их использованием возможно промышленное производство наукоемкой продукции, стоимость которой в сотни, тысячи и более раз превышает стоимость сырья. Успешное участие государства в рыночных межгосударственных отношениях определяется наукоемким уровнем и качеством продукции.
4. На текущем этапе развития научной методологии возможны различные подходы (концепции) получения необходимой информации: теоретико-аналитический, экспериментально-статистический, вычислительный эксперимент, эвристический, поиск существующих решений. Применительно к технологическим и техническим системам наиболее эффективными подходами являются экспериментально-статистический, вычислительный эксперимент, эвристический.
5. Прикладное научное описание технологических и технических систем возможно только на основе объективного, конкретного, системного отражения содержательной информации о технологической системе в формальное ее представление в виде, например, системы математических моделей. Такое отражение возможно с использованием идиографического подхода к описанию технологической системы, который по сравнению с номографическим подходом характеризуется конкретностью входных и выходных параметров технологической системы, несущественным абстрагированием от реальных свойств системы, проверкой адекватности полученного формализованного описания. Применение номографического подхода к формализации технологической системы по сравнению с идио-

графическим не дает в общем случае лучших результатов по критериям прикладного (инженерного) использования полученной информации.

6. Современная методология проведения экспериментальных научных исследований — основной подход в получении технологической информации. Она включает в себя прикладную статистику, теорию планирования эксперимента, вычислительный эксперимент, кибернетический подход в формализации технологической системы. Реализация методологии требует трудноформализуемых или неформализуемых действий и принятия решений на уровне эвристических.
7. На смену технической и последовавшей за ней технологической эпохам идет эпоха информационных технологий. Информационные технологии на текущем этапе развития промышленности рассматриваются как стратегическое направление совершенствования производства и экономики. Информационные технологии в наиболее развитых странах Запада, Японии превратились в экономику знаний и услуг: прибыль здесь в 15 раз превышает затраты, вложенные в обучение. Информация сегодня — и орудие производства, и товар, который можно продать. Значит получать ее нужно как можно больше.
8. Технология машиностроения — прикладная техническая область науки, изучающая связи и закономерности превращения исходных свойств сырья, полуфабрикатов в требуемую совокупность показателей качества изготовления машин, может выполнить наилучшим образом поставленные перед ней задачи, только используя полное информационное обеспечение проводимых технологических операций. Без такого обеспечения неизбежны потери в качестве производимых операций, их себестоимости, производительности труда. Уровень потерь характеризует совершенство производства и, следовательно, совершенство экономики.
9. Любая технологическая система без управляющих воздействий в процессе функционирования самопроизвольно эволюционирует к состоянию максимальной энтропии — возрастанию неопределенности, хаоса. Использование полезной информации повышает упорядоченность системы и приводит процесс ее функционирования к целеопределенным результатам.
10. В развитии человеческого общества и совершенствовании производства получение необходимой информации является первостепенным. В настоящий период и в будущем необходимая для жизни людей информация стала главным ресурсом.

Глава 2 Анализ свойств технологической системы

Проводя содержательный анализ технологической системы с целью ее дальнейшей формализации, мы должны сознавать первичность этой системы и вторичность ее отображения формальными математическими средствами. Технологической системе как физическому объекту реального мира свойственна объективность существования и абсолютность (независимость) от средств формализованного отображения: формализованное отображение технологической системы есть действие познающего эту объективность исследователя.

Английский физик Д.К. Максвелл следующим образом характеризует проблематику, близкую к рассматриваемой: "Если искусство математика позволило экспериментатору заметить, что измеряемые им количества связаны необходимыми соотношениями, то физические открытия показали математику новые формы количеств, которые он никогда бы не мог себе представить" [104, с. 169].

На пути к реализации технических проектов технология является определяющим этапом и становится философией производства. По мнению президента НАНУ акад. Б.Е. Патона, "научный результат начинает служить обществу, когда получает воплощение в технологии" [105, с. 4].

Анализ термина "технология" показывает, что содержание его неформально: первая часть термина в переводе с греческого означает искусство, мастерство, умение; вторая часть — учение, слово. По определению проф. Б.С. Балакшина технология машиностроения — отрасль науки, занимающаяся изучением закономерностей, действующих в процессе изготовления машин, с целью использования этих закономерностей для обеспечения требуемого качества машин и наименьшей их себестоимости [23, с. 4]. Проф. В.В. Данилевский определяет технологию машиностроения как науку, изучающую и устанавливающую закономерности протекания процессов обработки и параметры, воздействие на которые наиболее эффективно сказывается на интенсификации процессов и повышении их точности. Технология машиностроения изучает изготовление изделий заданного качества в установленном программой выпуске количества при наименьших затратах материалов, минимальной себестоимости и высокой производительности труда [106, с. 8].

Из приведенных определений следует, что установление информационных связей между условиями технологического производства и параметрами качества выпускаемых изделий в виде закономерностей (формой выражения которых могут быть стохастические математические модели) является одной из проблем этой прикладной науки.

Проведение содержательного анализа технологической системы необходимо для правильной формализации ее информационных связей, т.е. закономерностей протекания технологического процесса.

2.1 Технологическая система как объект формализованного информационного описания. Определение технологической системы

Технологическая система — совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций (по ГОСТ 27.004—85). Различают четыре иерархических уровня технологических систем: технологические системы операций, процессов, производственных подразделений (цехов), предприятий.

Проф. А.П. Соколовский отмечал, что "...учение о технологии машиностроения родилось в цехе" [107]. По определению проф. А.А. Маталина "технология машиностроения является прикладной наукой, вызванной к жизни потребностями развивающейся промышленности...". Особенность технологии машиностроения заключается в том, что она является комплексной инженерной и научной дисциплиной. Для ее научного развития необходимо использование достижений математических наук, электронной вычислительной техники, кибернетики и других современных теоретических и технических наук [36, с. 9; 10].

В обширной монографии по передовой технологии и автоматизации управления процессами обработки деталей машин [108] отражено современное состояние технологической науки и передовой практики предприятий машиностроения (к 1970 г.). Однако возможности методов многофакторного математического моделирования и многокритериальной оптимизации, кроме иллюстративного примера их применения, не приведены.

2.2 Значение и статус современных высокопроизводительных технологий

Технологические процессы и выполняющие их машины являются главными составляющими производства. Важность этой области определяется тем, что в ней занято около 70 % трудоспособного населения [109, с. 22].

Выбранный вариант технологического процесса обуславливает технологическую себестоимость и она существенно изменяется с изменением технологического процесса. В полной себестоимости продукции, которая характеризует экономическое совершенство работы предприятия, от выбранного варианта технологического процесса зависит 70—75 % всех затрат [38, с. 303]. Технологические процессы формируют обработку материалов, контроль, сборку изделий. В них закладываются потенциальные возможности качества и количества выпускаемой продукции, ее экономическая эффективность. Автоматизация и роботизация производства не могут дать более того, что заложено в технологии [110, с. 13].

Специалисты оценивают суммарный коэффициент полезного использования сырья, энергии в современном производстве самое большое — 10 % [111]. Поэтому различие между "технической" эпохой, для которой характерным было изготовить продукцию, особенно не считаясь с эффективностью производства, и "технологической" — принципиально. Достижение наилучших технологических качеств становится определяющим критерием. Способ производства продукции должен соответствовать экономическим, экологическим и социальным критериям.

Совершенно новые технологии могут быть созданы на базе проведенных фундаментальных исследований и использования новых или ранее неиспользуемых физических, химических и других эффектов. Только новые технологии могут дать жизненно необходимые для экономики, промышленности и общества результаты. Специфичность, "закрытость" технологической информации делает получение ее труднодоступной. Новые технологии позволяют создавать изделия при наименьших затратах ресурсов, успешно продавать изделия за рубежом.

Лидирующая роль технологии признается и американскими специалистами. "Тот, кто создает технологию, тот и завоевывает рынок. Сегодня технология служит двигателем мировой экономики" [112, с. 177] — считает Брюс Меррифилд, помощник министра торговли США по вопросам эффективности производства, технологии и инновации. Технологическая инновация, технологическое "ноу-хау" стали залогом экономического процветания Японии. Общая эффективность американской и японской промышленности выросла на 15 % в результате изменений в характере использования рабочей силы. 25 % роста обеспечили капиталовложения и не менее 60 % явилось результатом изменений в технологии [112, с. 177].

Среди промышленно развитых стран мира доминирует новейшая технология. США затрачивают на ее разработку 60 % промышленных инвестиций. Высокотехнологическая продукция представляет ключевой элемент внешней торговли США. Ее доля в совокупном объеме экспорта в 1980 г. составила более 44 %. Однако США испытывают беспокойство по поводу технологического наступления конкурентов [113, с. 12].

Примером перехода на выпуск интеллектуальноемких изделий от емких в сырьевом и энергетическом отношении может служить переориентация японского производства после известного нефтяного кризиса. Технология количества, объема уступила технологии качества, в основе которой научные, технологические разработки, ноу-хау конструкторов, технологов, испытателей. В 1986 г. Япония расходовала на научные и технологические разработки 57 млрд. долл. США и вышла на второе место в мире после США [10, с. 14].

Японские автомобильные фирмы, пытаясь победить в жесткой конкурентной борьбе, основную ставку сделали на интеграцию в одну производственную систему, тщательную отработку технологических процессов. Исследования показали, что трудоемкость одной легковой машины японского

производства составляет в среднем 17 ч, а в Европе — вдвое больше. В Японии машину полностью разрабатывают и запускают в серию за 3—4 года, а в Европе — за 5—6 лет [114, с. 28]. Математическое обеспечение является одной из наиболее наукоемких продукций. Большинство специалистов связывает с ним магистральное развитие научно-технических разработок. В японской промышленности для совершенствования технологических процессов, конструкций широко используют экспериментально-статистические методы, которые обычно связывают с деятельностью доктора Г. Тагути.

Обычно технологию понимают как искусство реализации промышленных процессов с целью оптимизации производства. Однако новая технология не оптимизирует действующее производство, а создает принципиально новую техническую базу цивилизации. Анализ состояния используемых технологий дает основания утверждать, что исторически сложившийся, традиционный подход к производству создает технологический кризис. Наши затраты по энергии на производство стали, алюминия, цемента, бумаги в среднем на 20—50 % больше, чем у лучших западных фирм [115, с. 3]. Принципиальное изменение технологического подхода заключается в переходе от принципа "что и сколько сделать" к концепции "как, зачем, с какими затратами и риском". Известно, что эта проблема весьма актуальна для Украины.

Какое же должно быть отношение к современным технологиям? Достаточно привести мнение президента НАНУ акад. Б.Е. Патона: "Без таких технологий (высокие технологии — Р.С.) никакая перестройка нашей экономики не возможна..." [1, с. 12]. Разработка современных технологий, в том числе и информационных, для различных отраслей хозяйства — стратегическая цель совершенствования экономики Украины.

2.3 Проблема качества производства изделий

Экономическая эффективность использования техники в промышленности и народном хозяйстве зависит от качества производимых машин, технологии их изготовления, технически правильного обеспечения эксплуатации. Специалистам известно, что при эксплуатации высококачественных изделий можно получить огромную прибыль. Увеличение пробега автомобильных шин на 10 % равнозначно увеличению их производства также на 10 %. При этом затраты возрастают лишь на 0,2 %. Увеличение срока службы электроламп на 40 % повышает их себестоимость всего лишь на 20 %. Трудозатраты на замену бракованной детали во время эксплуатации машины в 10 раз выше, чем на стадии ее производства [116, с. 5]. Описание научно обоснованных методов повышения качества продукции автоматизированного механосборочного производства приведено в [317].

В 1987 г среди завершенных научно-технических работ по данным Госкомстата СССР только 10 % были выше передовых зарубежных; соответствовали им 35—40 %. Причина такого положения в том, что наука не

обеспечила тот задел, который позволил бы отраслям народного хозяйства подняться на новую ступень развития [117, с. 2].

Передовые принципы обеспечения качества продукции предусматривают основные действия в создании качества — 75 % мер из 100 % на этапе поиска конструктивных решений, проектирования, отработки макетного и доводки опытных образцов, отладки технологии. На контроль самих производственных процессов американские специалисты затрачивают 20 %, только 5 % — на окончательную приемку изделия. Однако в японском производстве на приемку изделия затрачивают только 1 %, а все остальное — на обеспечение качества в предшествующих этапах [118, с. 153].

Все предшествующие контролю готовой продукции этапы создания изделий требуют надежного, многокритериального информационного обеспечения. Необходимую информацию могут дать многокритериальная оптимизация и многофакторное математическое моделирование технических и технологических систем. Математическое моделирование должно сопровождать планирование и реализацию всех научно-технических разработок. Без его использования нельзя обеспечить высокое качество продукции [119, с. 3].

О масштабах борьбы за рынок, в которой информация о качестве выпускаемых товаров имеет лидирующее и решающее значение, свидетельствует доклад, подготовленный международной маркетинговой фирмой "Джиди Пауэр" о качестве легковых автомобилей многих фирм мира. Специалисты фирмы провели опрос более чем 21000 американских владельцев автомобилей выпуска 1989 г. по 88 параметрам эксплуатации машин. Японские автомобили по результатам исследования получили 128 очков по сравнению со 116, завоеванными американскими автомобилями. Два года назад разрыв составил 19 очков [120, с. 5].

Понимание проблемы качества выпускаемой продукции в период рыночных отношений будет неполным без рассмотрения опыта Японии и США.

Борьба за рынки сбыта продукции послужила для Японии важнейшей причиной улучшения качества производства изделий. Всеобъемлющее использование информационных технологий, начиная с огромных исследовательских центров и кончая использованием специально разработанных приемов анализа состояния качества для сотен тысяч кружков контроля качества, и реализация рекомендаций дали огромный эффект и вылились в непрерывающийся процесс всеобщего улучшения качества продукции.

Качеству выпускаемой продукции в Японии придают огромное значение. На телевизиорном заводе фирмы "Матусита дэнки" дефектная продукция (определяемая подчас только специальными измерительными приборами) составляет 0,05 %, в фирме "Тоета" — 0,009 %, в фирме "Ниссан" один дефект приходится на две машины. Для сравнения укажем, что каждый американский автомобиль имеет в среднем пять дефектов [10, с. 41]. На каждый автомобиль, сходящий с конвейеров Волжского автозавода, приходится от 40 до 60 недоделок [121, с. 1].

Не следует считать, что приведенные цифры отражают только традиционную область японских товаров — автомобили и бытовую электронику. В японских комнатных кондиционерах в 70 раз меньше дефектов, чем в американских, ломаются они в 17 раз реже, чем сделанные на заводах США [10, с. 42].

Понятие "высокое качество технологии" проникло в организацию и построение производственных процессов, построение производственного цикла выпуска продукции участков, цехов и предприятия. Система "канбан" — средство осуществления системы "точно вовремя" (just-in-time), т.е. в необходимое время и в необходимом количестве — существенно повлияла на себестоимость малолитражного автомобиля, и в итоге японцы тратят на производство одного автомобиля на 1600 долл. меньше, чем американцы [10, с. 42].

"Канбан" является информационной системой и оперативно регулирует количество продукции на различных стадиях производства. Система "точно вовремя", действуя на всей фирме, устраняет с предприятия ставшие ненужными запасы материалов, существенно уменьшая складские запасы и склады. Затраты на содержание запасов уменьшаются, норма капиталоборота растет.

Рассматривая проблему качества производства изделий, необходимо упомянуть о деятельности в Японии кружков контроля качества. Если в 1965 г. в Японии было зарегистрировано 4930 кружков с числом членов 70920, то на декабрь 1988 г. это число возросло до 282723, а число участников в них — до 2242018 [30, с. 37]. По японским оценкам средняя экономия в год от реализации одного предложения кружка качества составляет около 5000 долл. По данным Японского центра производительности на каждого члена кружка в год в среднем приходится 50—60 внедренных предложений [122, с. 93]. Благодаря деятельности этих кружков, автомобильная фирма "Ниссан" с 1978 по 1984 гг. сэкономила 160 млн. долл. [10, с. 49]. Большинство сборочных заводов "Ниссан" в 1983 г. были самыми современными в мире. Кружки контроля качества внесли 827859 предложений по усовершенствованию качества и 80 % из них были внедрены. Подобные примеры можно было бы приводить и далее.

Под напором конкурентов (особенно японских фирм) почти 9/10 крупных промышленных корпораций США значительно расширили и активизировали свои программы, направленные на улучшение качества продукции. "Качество стало религией" — говорит Д. Скалли, председатель компьютерной корпорации "Эпл" [31]. Примером проникновения на рынок через обеспечение высокого качества продукции может служить девиз американской корпорации "Боус": "Лучший звук — через исследования" [123].

— В 1987 г. только в 9 американских колледжах и университетах можно было пройти курс обучения и получить диплом по специальности "технология качества". В 1989 г. такой курс читали в 40 учебных заведениях,

в 1990 г. их число еще увеличилось [31, с. 5]. Однако нам неизвестно, что в вузах Украины есть такой курс, хотя для инженеров-технологов чтение его крайне необходимо.

В улучшении качества выпускаемой продукции участвуют миллионы людей в разных странах мира. Кроме качества товаров современное понимание качества включает в себя качество услуг, учебы, получаемой информации, проведенных научно-исследовательских разработок. Из сферы материального производства оно распространилось в области здравоохранения, образования, экологии.

2.4 Анализ факторов технологической системы и их классификации

Под фактором технологической системы будем понимать независимую переменную величину, при изменении значения которой изменяется (изменяются) параметр (параметры) качества технологической системы.

При проведении технологического экспериментального исследования факторы, исходя из возможности управления ими, можно подразделить на следующие группы.

Управляемые факторы — X_1, X_2, \dots, X_k — можно изменять и поддерживать на определенных уровнях в процессе подготовки и осуществления технологического эксперимента с необходимой точностью. Случайные и систематические ошибки уровней факторов в повторных опытах пренебрежимо малы, а их коэффициенты вариации существенно (на порядок и более) меньше, чем коэффициенты вариации критериев качества.

С помощью управляемых факторов можно целенаправленно воздействовать на параметры качества технологической системы.

Неуправляемые факторы — Z_1, Z_2, \dots, Z_n — можно контролировать с необходимой точностью, но нельзя изменять и поддерживать с заданной условиями технологического экспериментального исследования точностью. Значения указанных факторов обычно заключены в определенных пределах, устанавливаемых техническими условиями или допусками, либо неподвластны действиям исследователя.

Примерами таких факторов могут быть физико-механические свойства обрабатываемых материалов; внешние условия проведения эксперимента (характеристики окружающей среды, вибрация близстоящего оборудования); личностные психофизиологические характеристики, профессиональные навыки, опыт различных исполнителей (экспериментаторов). За время проводимых экспериментов эти факторы могут изменять свои значения.

К неконтролируемым факторам — W_1, W_2, \dots, W_l — относятся такие, информация о которых во время проведения технологического эксперимента по тем или иным причинам у исследователя отсутствует.

Последняя группа факторов отражает известный философский тезис о бесконечности познания реального мира и конечности его относительно определенного исторического этапа познания.

Факторы могут быть качественные и количественные. Качественные факторы — вещества, материал; проводящие исследование экспериментаторы; способы конструктивного исполнения инструмента, детали, узла; блоки эксперимента — выражаются количественно в шкалах наименований и порядка. Однако присвоенные индексы (числовые значения) нельзя рассматривать как действительные числа, так как они не обладают многими свойствами действительных чисел.

Для выражения количественных факторов используются шкалы интервалов, отношений, разностей, абсолютные.

В проводимом технологическом экспериментальном исследовании каждый фактор должен иметь область определения — множество всех значений фактора в данном эксперименте. Она может быть непрерывной и дискретной. В некоторых технологических исследованиях целесообразно классифицировать факторы на простые и сложные. Простой фактор не подразделяется на другие факторы, т.е. формально есть функция самого себя. Сложный фактор — функция других, физически независимых факторов. Примером могут быть задачи, решаемые с применением критериев подобия, относительных и удельных показателей.

Условия проводимого эксперимента могут быть таковы, что сложный фактор может быть представлен как сочетание реального (физического) фактора и фиктивного, т.е. формального, не имеющего физического смысла. Фиктивный фактор позволяет представить уровни технологического фактора в планируемом эксперименте в соответствии с требованиями матрицы плана эксперимента, тогда как в рабочей матрице плана эксперимента технологический фактор может быть представлен произвольными значениями уровней.

На значения параметров качества технологических систем и производимых изделий влияет значительное число факторов. Например, на качественные показатели наружной резьбы при нарезании ее самораскрывающейся резьбонарезной головкой влияет свыше 30 факторов [124, с. 31–34]; стан горячей прокатки труб в первом приближении описывается 30 переменными. Процесс производства титановой губки в ретортах — около 50, производство $TiCl_4$ из TiO_2 — больше 100 [125, с. 147].

При улучшении качества технических и технологических систем транспортирующих механизмов бортовой аппаратуры магнитной записи с фрикционными передачами было рассмотрено более 150 факторов, влияющих на работоспособность фрикционных передач [126, с. 7]. Из 150 факторов выделены 40 для дальнейшего исследования [126, с. 8]. Известный специалист по сверлам и сверлению к.т.н. В.И. Жилис считает, что в уравнении $T = f(I, U)$, где T — стойкость инструмента, I — сложный комплекс факторов,

описывающий инструмент, а Y — сложнейший комплекс факторов, описывающий условия эксплуатации, каждая из групп факторов I, Y "...включает в себя сотни переменных величин, поэтому уравнение $T = f(I, Y)$ практически сегодня составить нельзя" [127, с. 4]. В качестве иллюстрации приводятся 43 фактора, влияющих на стойкость и работоспособность сверла, составленные D.F. Galloway (Англия) [127, с. 8].

Критерии качества технологических процессов обработки материалов определяются значительным числом факторов. На шероховатость обработанной поверхности при чистовом точении в проводимом исследовании [128, с. 220—225] влияло 25 факторов, которые при анализе были объединены в группы факторов условия резания, инструмент, станок, материал изделия. Среди них были сложные и качественные факторы.

Аналогичные примеры можно было бы продолжить. Специалисты считают, что в технологии литейного производства деталей на качество отливок влияет до 2000 факторов, а в многостадийной технологии, начиная с получения высококачественных исходных материалов до выхода готовых интегральных схем — более 3000 факторов.

Для получения многофакторной математической модели необходимо из значительного числа факторов, влияющих на моделируемые критерии качества, выбрать наиболее значимые, т.е. статистически значимые. В прикладной статистике и теории планирования эксперимента разработан специальный метод — отсеивающий эксперимент — для выделения статистически значимых факторов. Важен также априорный анализ группы факторов для последующего включения в оптимизационный или модельный эксперименты.

Факторы могут взаимодействовать между собой и создавать взаимодействия факторов. Кроме главных эффектов различных порядков на критерии качества могут влиять и различные взаимодействия факторов. Они создают системный эффект влияния факторов на моделируемый критерий качества [129, с. 58—63]. При создании многофакторных математических моделей технологических систем выявление взаимодействий факторов, их оценка являются определяющими для получения качественных моделей. Участие факторов в информационной модели технологической системы показано на рис. 2.1.

2.5 Анализ свойств параметров качества машин. Классификация их на детерминированные, вероятностные и индетерминированные (адаптивные)

Совершенство технологических систем и производимых с их использованием изделий, машин описывается группой критериев качества, т.е. наблюдаемых переменных величин, зависящих от факторов технологической системы.

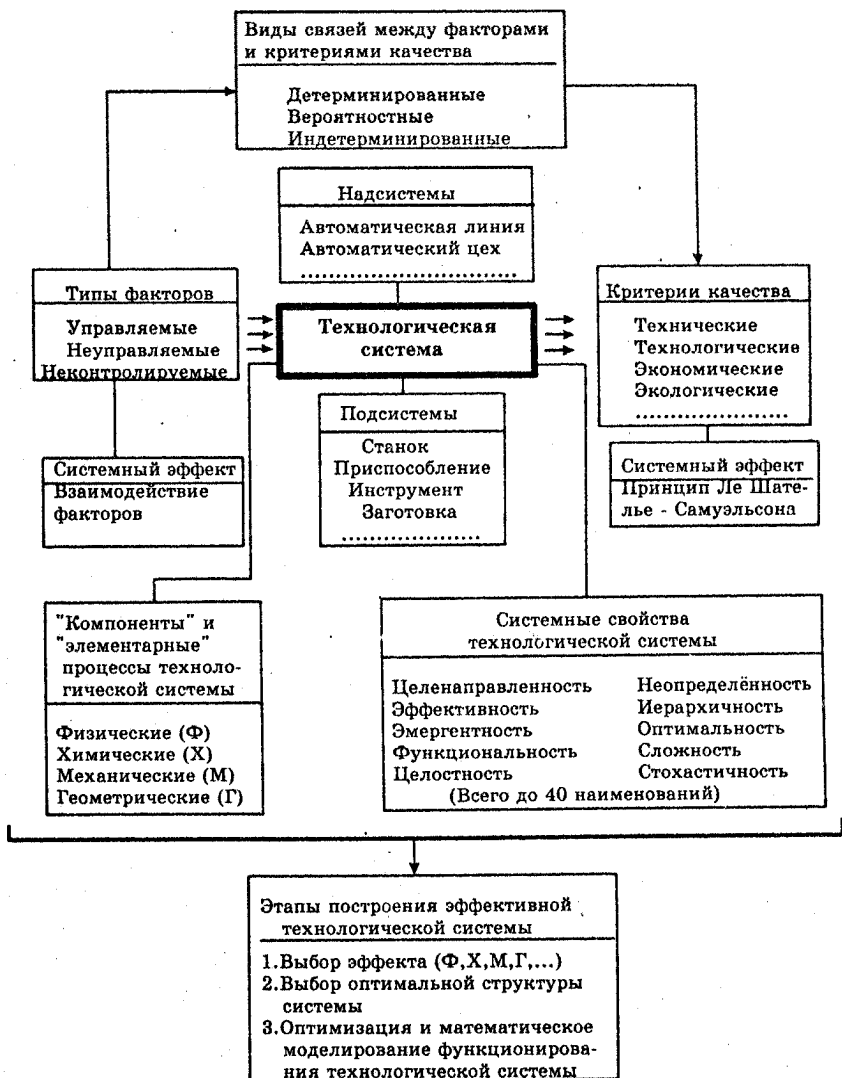


Рис. 2.1. Информационная модель технологической системы

В задачах оптимизации и математического моделирования технологических систем критерии качества могут иметь технологический, технический, технико-экономический и экономический смысл. Необходимо всегда помнить, что при оптимизации технических и технико-экономических критериев качества должны также обеспечиваться высокие экономические показатели. Из приведенного следует, что при комплексном анализе качества машин необходимо во взаимной связи рассматривать вопросы точности, шероховатости поверхности, себестоимости, производительности, трудоемкости изготовления и другие критерии.

Обеспечение системных свойств критериев качества порождает системный эффект, который для технических и экономических систем получил название принцип Ле Шателье-Самуэльсона (рис. 2.1) [130, с. 23; 76]. Наиболее распространена следующая формулировка этого принципа для физических (технических) систем: внешнее воздействие, выводящее систему из устойчивого равновесия, стимулирует в ней процессы, стремящиеся ослабить результат этого воздействия.

Современные сложные системы нельзя полностью характеризовать 3–5 критериями качества. Практика работ со сложными системами показывает, что нижний уровень "достаточности" критериев качества имеет 10–15, средний 20–35, сравнительно высокий 40–60 наименований. Так, например, Международная маркетинговая фирма "Джи-ди Пауэр" при проведении анализа качества легковых автомобилей многих фирм мира учитывала 88 параметров эксплуатации машин [120, с. 5].

Правильное научное описание и интерпретация критериев качества технологических систем возможны только при соответствии применяемого математического аппарата уровню сложности этих критериев. Автор рассмотрел этот вопрос в 1976 г. в монографии [131, с. 5–20].

В зависимости от уровня сложности критерии качества технологических систем и машин можно разделить на детерминированные, вероятностные и индетерминированные (адаптивные) (рис. 2.1).

Детерминированными критериями считают такие, численные значения которых известны и не содержат неопределенностей. Если интервал неопределенности, в котором заключено истинное значение критерия, настолько мал по сравнению с его значением, что этим интервалом при решении конкретной задачи можно пренебречь, то такой критерий также можно отнести к детерминированным. Изменение значений детерминированных критериев происходит вполне определенно и однозначно.

Детерминированные критерии сравнительно редко встречаются в технологических системах и машинах. К ним могут быть отнесены дискретные величины (число зубьев металлорежущего инструмента, перьев метчика и т.п.); размеры изготовленных деталей, если погрешности их изготовления пренебрежимо малы по сравнению с номинальными значениями размеров;

номинальное положение деталей в изделии по отношению к исходной модели, представленной сборочным чертежом.

При расчете характеристик рабочих органов металлорежущих станков, в частности, расчетах жесткости системы шпиндель — патрон — деталь успешно используется подход, предложенный д.т.н. Ю.Н. Кузнецовым [132, с. 176—181].

Концепция построения точных математических моделей процесса образования геометрических погрешностей обработки деталей на одно- и многоинструментальных станках для расчета точности машин на ЭВМ изложена в [133]. По мнению д.т.н. Б.М. Базрова разработка единого подхода, метода построения математических моделей механизма образования геометрических погрешностей должна базироваться на использовании идеализированных объектов [133, с. 47].

Детерминированные критерии качества являются простейшим типом и могут рассматриваться как частный случай вероятностных, к которым относятся массовые однородные случайные величины, имеющие определенный известный закон распределения. Вероятностные параметры качества относительно друг друга независимо и случайно изменяют свои значения в общей массе величин, которая описывается законом распределения. Собственные параметры закона распределения являются детерминированными величинами.

Таким образом, в выборке (группе результатов наблюдений или экспериментов) изменяющиеся случайно вероятностные параметры подчиняются определенным детерминированным закономерностям. С увеличением числа элементов выборки степень детерминированности оценок параметров закона распределения возрастает. Тип закона распределения либо устанавливается теоретически, если представляется возможным, либо выдвигается в виде гипотезы и проверяется по определенному критерию согласия. Параметры закона распределения критериев качества технологических систем обычно определяются по результатам выборочных наблюдений.

Примерами вероятностных критериев качества являются стойкость режущего инструмента, точность обработки, характеристики шероховатости микрорельефа реальной поверхности обработанных деталей, если числовые значения этих критериев качества подчиняются определенным законам распределения. Общеизвестной является классификация технологических процессов механической обработки в виде совокупности количественных характеристик начальных или исходных свойств продукта и его окончательных свойств "как ряда последовательных многомерных и многомерных вероятностных процессов, зависящих от одного основного параметра t — времени течения процесса при изготовлении партии или подпартии изделий на рассматриваемой стадии процесса и от дополнительных параметров S_i , например, пространственных координат" [134, с. 10].

Практика количественного анализа случайных параметров технологических процессов показала, что все многообразие реальных проявлений нельзя свести только к теоретико-вероятностной модели. "Некоторое свойство является теоретико-вероятностным тогда и только тогда, когда оно описывается с помощью распределений" [135, с. 15]. Случайный характер проявления критериев качества может и не описываться законом распределения в теоретико-вероятностном понимании: параметры закона распределения или задание их в виде известных зависимостей, устойчивость частот и другие условия могут быть не известны или не выполняются. Тогда такие параметры должны быть отнесены к индетерминированным (термин предложен чл.-кор. НАНУ А.Г. Ивахненко), иначе адаптивным (термин предложил акад. РАН Я.З. Цыпкин).

Для индетерминированных критериев качества статистическая проверка Гипотез относительно каких-либо их свойств о принадлежности к одной и той же генеральной совокупности может отвергаться при высоком уровне значимости. Основные причины отсутствия информации связаны с трудностями изучения индетерминированных критериев качества, значительной их изменчивостью, неустойчивостью, сложностью замера их фактических значений и последующего хранения и использования в условиях действующего производства. Индетерминированные критерии качества изменяются наиболее сложным образом по сравнению с детерминированными и вероятностными. Информация о них может быть получена по результатам наблюдений за функционированием системы, технологического процесса или по специально проведенным экспериментальным исследованиям.

Примерами адаптивных критериев качества могут быть свойства отливок, поступающих на механическую обработку, при ручной формовке и отливке в земляные формы; стойкость твердосплавного напайного инструмента (резцы, фрезы) при ручной заточке; точность обработки деталей при изменяющихся свойствах технологической системы.

Отнесение (классификация) параметров качества к одному из рассмотренных типов является необходимой для правильного понимания проблем, выбора концепции и методов формализованного описания технологических систем. Как показывает практика проведенных исследований, абсолютная определенность в классификации не может быть достигнута. Следует также учитывать изменения научной парадигмы, выразившейся в переходе от детерминированного понимания реальности к вероятностной картине, а затем и к индетерминированной (адаптивной). Рассмотрим кратко наиболее важные точки зрения на эту проблему.

Лауреат Нобелевской премии И.Р. Пригожин обращает наше внимание на то, что "...рамки классического понимания науки... стремятся представить природу в виде отлаженного механизма, управляемого вневременными и детерминированными законами" [136, с. 10].

Известный американский математик Р. Беллман отмечал, что "...никогда научная жизнь не будет уже такой безоблачной и спокойной, как в дни, когда безраздельно царствовал детерминизм. Образовавшиеся теперь перед нами пустоты и наш тяжелый труд частично компенсируются пониманием того, что наш подход к решению наиболее важных задач стал более реалистичным и продуктивным" [137, с. 440].

До настоящего времени при расчетах режимов резания для сталлорежущих станков специалисты трактовали стойкость режущих инструментов как детерминированную величину. Однако, как отмечал проф. С.С. Четвериков, фактическая стойкость каждого из n последовательно соединенных режущих инструментов является случайной величиной [138, с. 3–4]. Авторы монографии считают, что "стойкость инструмента — это среднее значение некоторой непрерывной случайной величины (фактической стойкости)... Разброс износных отказов характеризуется средним квадратическим отклонением s . Не учитывая разброса стойкости, невозможно определить оптимальное время профилактической сменности инструмента" [138, с. 9].

Исследования, проведенные после публикации первой в этой области работы американского метеоролога Е.Н. Лоренца (1963 г.) и особенно в 80-е годы с нелинейными системами малой размерности путем применения к анализу их траекторий быстродействующих компьютеров, показали, что высокая чувствительность к начальным условиям приводит со временем к хаотическому, т.е. беспорядочному, нерегулярному поведению системы [139, с. 12–13]. Многочисленные проверки с помощью компьютера поведения самых разнообразных систем, в том числе и механических, показали, что это типичное свойство многих систем. Такое поведение в некоторых работах получило название "детерминированный хаос" [139, с. 10]. Таким образом, поведение физических систем, по времени детерминированное, порождает хаотическое движение и хаотические траектории [139, с. 12–13]. Установление таких фактов вызвало потрясение, сравнимое с тем, "какое последовало за открытием возможности лишь статистических предсказаний в квантовой механике" [139, с. 14]. Понимание отличной от детерминистической парадигмы картины реальной действительности затруднено даже для известных ученых. А. Эйнштейн так и не смог принять вероятностную картину процессов в микромире [140, с. 6].

Парадигма детерминированного понимания мира и вытекающих из этого понимания возможностей часто аналогична той, которая принадлежит французскому физику, астроному и математику П.С. Лапласу [141]. Лапласовский детерминизм стал нарицательной парадигмой механистических представлений классической физики. В описании технологических систем его применение ограничено.

Вероятностное истолкование процессов и величин в технологических системах получило подтверждение в значительном числе исследований. Д.т.н. проф. М.И. Клушин, рассматривая обработку металлов резанием как

прикладную технологическую науку, отмечал, что взаимосвязи механических, физических и других явлений "не являются однозначно детерминированными... и значительно более правильно и полно отражаются статистическими математическими моделями" [20, с. 8—9].

К.т.н. Ю.А. Грицаенко обращает внимание на неустойчивую, неоднозначную работу инструмента, что приводит к рассеиванию его фактической стойкости. Разрушение инструмента рассматривается как случайный процесс [142, с. 6—9].

Рассматривая прогнозирование в теории точности производства (применительно к токарной обработке на автоматах и автоматических линиях), д.т.н. А.Н. Курапов весь комплекс предпосылок по классификации основных понятий — получение детали, размер параметра, описание технологического процесса, изготовление партии деталей выбрал на основе понятий случайное событие, случайная величина, случайная функция, случайный процесс [143, с. 4]. Преобразующая система рассмотрена на базе случайных функций. Технологический процесс описывается закономерностями случайной нестационарной функции, параметры которой не сохраняются во времени [143, с. 7, '2].

Акад. Ю.В. Линник и к.т.ч. А.П. Хусу впервые в исследовании шероховатости реальных поверхностей предложили описывать нерегулярный профиль на базе стохастических представлений, "...когда шероховатость имеет нерегулярный характер и обычные расчеты без разумной стохастической основы становятся непригодными" [144, с. 7].

Проф. В.А. Кудинов считал разработку статистических методов основным направлением работ по динамике металлорежущих станков. Внешние воздействия имеют случайные составляющие. Параметры системы станка и характеристики случайных воздействий на нее также подчиняются статистическим закономерностям. Базой для проведения разработок в этой области может служить статистическая динамика [145, с. 345—346].

К.т.н. В.А. Синопальников указывает на расхождения между стойкостью режущего инструмента, рассчитанной по эмпирическим формулам, и результатами, наблюдаемыми в конкретных опытах. "Такие расхождения обусловлены тем, что в формулах предусмотрена жесткая функциональная связь между параметрами резания, в то время как в действительности связь между ними имеет вероятностный характер" [146]. Многочисленные поправочные коэффициенты следует считать случайными величинами. Автор статьи приходит к выводу, что "применение теории случайных функций в резании не исключает, а подтверждает важность и необходимость лабораторных и производственных исследований, так как предполагает построение всех выводов и обобщений на основе опыта" [146].

Нестабильность условий протекания технологических процессов приводит к значительным изменениям критериев качества. Так, например, фактическое значение стойкости режущего инструмента зависит от стабильности

обрабатываемости материала. Проф. А.М. Вульф приводит данные о том, "что разброс показателей обрабатываемости для хороших плавок выражался в 15–20 %. Но этот разброс вырос до 400 % при сравнении различных плавок и доходил даже до 2000–5000 %" [94, с. 200].

Воспроизводимость, т.е. стабильность повторяемости характеристик технических и технологических систем одного типоразмера, изготовленных в номинально одинаковых условиях, в практике реального выпуска продукции бывает достаточно плохой, так как характеристики жесткости отдельных станков одной модели в ряде случаев отличаются в несколько раз [147, с. 22]. Значительный разброс жесткости металлорежущих станков приводит к корректировке нормативных режимов резания [148, с. 152]. Однако корректировка возможна только на основе знания конкретных технологических параметров системы станок — приспособление — инструмент — заготовка, которые можно получить только путем проведения замеров свойств этой системы. Такой подход логично рассматривать как действия с индетерминированной (адаптивной) системой. Отсюда следует важный прикладной вывод: знания одних лишь теоретических формул для реальных технологических систем может быть недостаточно. Необходимо также знать фактические значения параметров состояния этих систем, которые даже для конкретной технологической системы изменяются со временем ее работы (функционирования). Это возможно лишь на основе замеров состояния технологической системы.

В рамках рассматриваемой проблемы представляют интерес выводы о возможностях аналитических методов, применяемых в системе научного эксперимента [149]. Для детерминированных физических объектов использование аналитического метода затруднений не вызывает. В вероятностных физических системах однозначное толкование причинно-следственных связей затруднено. Их описание возможно на основе статистической обработки экспериментального материала. Системы с индетерминированными связями вообще не поддаются формальному описанию: их возможно описывать с использованием эвристических методов и связанных с ними моделей [149, с. 11].

Анализ свойств сложных систем на основе детерминированного, вероятностного и индетерминированного (адаптивного) подходов позволяет сделать следующий вывод. При рассмотрении взаимодействий различных подсистем и формализованном описании свойств технологической системы станок — приспособление — инструмент — заготовка мы вынуждены отказаться от детерминированного рассмотрения, как не соответствующего реальной действительности, и перейти к вероятностному (стохастическому) описанию. Для этого необходимо убедиться, что интересующие нас величины не противоречат вероятностному характеру поведения.

2.6 Технологические и технические системы как объекты с неполной информацией об их содержательных свойствах

При использовании математического аппарата для изучения реальных технологических систем необходимо учитывать его принципиальные свойства и вытекающие из них возможности. Изучение математических структур в классической математике происходит на основе закона классической логики — закона исключенного третьего: одно из двух высказываний "А" и "не А" является истинным, третьего не дано [150, с. 87]. Он был предложен Аристотелем и изложен в его сочинении "Органон" (Инструмент [мышления]), около 300 г. до н.э. В математической логике это соглашение задается аксиомой $AV \vee \bar{A}$. Тогда результатом логического вывода могут быть высказывания типа "да" и "нет". Высказывания типа "может быть", "возможно при некоторых формально не заданных условиях" не рассматриваются. Для применяемого математического аппарата необходима исчерпывающая исходная информация о свойствах и характеристиках изучаемых технологических систем. Если математические структуры являются описанием реальной технологической (технической) системы, то к этим описаниям также предъявляются аналогичные требования. Однако в реальной исследовательской практике изучения технологических систем, не говоря об их функционировании в цеховых условиях, обеспечить полноту и истинность исходной и последующей необходимой информации об их свойствах не представляется возможным. Приведем конкретные мнения исследователей и результаты исследования о полноте информации содержательных свойств технологических систем.

Акад. И.И. Артоболевский рассматривал технологические системы как системы с неполной информацией [151, с. 16]. "Процессу функционирования больших технологических систем и процессу их синтеза свойственна известная неопределенность, вызванная неполнотой информации об условиях эксплуатации, о качестве используемых систем и т.п.". Отмечается, что вследствие множества варьируемых переменных и стохастического характера этих переменных, начальных условий, проектирование сложных технологических систем машин и линий встречает большие математические трудности [151, с. 17].

Проф. В.А. Вознесенский также обращал внимание на указанные свойства сложных систем. "К сожалению, в технологических, технико-экономических и других реальных сложных системах неизвестны ни вид функции φ (уравнение состояния системы — Р.С.), ни полный набор факторов X_{φ} , ни числовые значения констант (коэффициентов) B_{φ} , ни законы распределения случайных величин ε_{φ} , ни граничные условия" [152, с. 12].

К.т.н. В.И. Леопольд провел исследование информации, используемой для управления процессом достижения точности размера детали при выполнении технологической операции на фрезерно-расточных станках с числовым программным управлением — ЧПУ [153]. Несмотря на то, что использо-

вался станок с ЧПУ, за рабочим была закреплена значительная часть функций по формированию управляющей информации. Это проявлялось в том, что ему приходилось самому принимать большинство решений по управлению ходом технологического процесса. Доля решений, принимаемых рабочим, составляет для этапов: 1. подготовки к выполнению операций — 83,3 %; 2. установки заготовки — 62,5 %; 3. статической настройки системы СПИД — 78,0 %; 4. обработки заготовки — 88,7 % [153, с. 20]. "Результаты проведенных наблюдений показали, что независимо от формы технологических документов, поступающие на рабочие места станочников, содержащаяся в них информация является неполной" [153, с. 9]. Восполнить эту информацию может лишь человек — рабочий, наладчик-оператор, технолог. Источники для получения такой информации неформальны: опыт прошлой работы, интуитивные представления, "ноу-хау", конкретный анализ имеющейся технологической ситуации. Однако, как формализовать и запрограммировать эти источники информации для станков с ЧПУ?

Рассматриваемая неопределенность состояния сложных систем является весьма типичной. Группа авторов в учебном пособии для вузов приходит к выводу, что "...когда речь идет о количественных применениях теории или когда конкретная система исследуется эмпирическими методами, возникают многочисленные статистические задачи" [154, с. 205]. Эти задачи возникают потому, что "на практике мы, однако, как правило, располагаем лишь частичной информацией о функционировании изучаемой системы... Такие ситуации наиболее сложны для исследования и приводят к интересным проблемам" [154, с. 206]. Исследователь располагает лишь частичной информацией о функционировании изучаемой системы. Следовательно, полное решение задачи не всегда удается получить.

Работа исследователя в условиях информационной неопределенности, когда решение задачи не обеспечивается требуемым объемом и качеством исходных данных, весьма типична для современных системных прикладных задач. Отсутствие полноты информационного описания свойств и состояния технологической системы приводит к рассеиванию реальных размеров производимых деталей, к невозможности абсолютно точного, надежного прогноза производства деталей и поведения технологической системы.

Акад. Н.Д. Кузнецов, рассматривая процесс исследования и конструирования сложных технических систем — современных вариационных двигателей, приводит предметные области (этапы создания конструкции), в которых критерии качества либо не поддаются расчету, либо рассчитываются с недостаточной достоверностью [155, с. 52–53]. Одна из причин такого положения состоит в отсутствии исходной и функциональной, т.е. полученной в процессе работы, информации о свойствах материалов и их поведении в работе.

Используя в математических расчетах параметры состояния технологических и технических систем, необходимо помнить, что истинное значение

измеряемой величины остается неизвестным. На практике можно найти лишь приближенную оценку погрешности измерения [156, термин 8.2]. Вместо истинного значения интересующего исследователя величины используется действительное значение величины, найденное экспериментальным путем [157, с. 5–6]. Практика замеров величин реальных технологических и технических систем показывает, что абсолютная погрешность измерения определяется трудоемко, сложно, ненадежно.

Методология решения системных технологических задач должна учитывать неполноту информации о системе и быть подчиненной решаемой задаче. Критерием качества должна быть практическая пригодность полученного решения. Такой подход в решении прикладных задач получил название "методологического прагматизма".

Один из возможных приемов получения неизвестной информации о системе — переход от исчерпывающего ее задания, необходимого в теоретико-аналитическом подходе, к экспериментально-статистическому подходу. В последнем любая необходимая информация задается в неявном виде самой системой и получается (реализуется) в процессе экспериментирования с ней в виде результатов экспериментов.

2.7 Статус реальной технологической системы

Современные технологические системы и технологическое производство характеризуются следующими тенденциями развития:

- а) возрастание сложности выпускаемых технических систем и, следовательно, технологического обеспечения выпускаемой продукции;
- б) существенное улучшение многих критериев качества выпускаемой продукции;
- в) рост номенклатуры выпускаемой продукции (по отраслям и по всей промышленности);
- г) возрастание значения информационного обеспечения для технических и технологических систем: использование АСУ ТП, САПР; использование вычислительной техники в управлении производством и технологической подготовке производства; получение необходимой информации с использованием автоматизированных систем научных исследований (АСНИ);
- д) уменьшение (для мировой практики) периода использования технических и технологических систем в эксплуатации.

Технологические системы независимо от их предметной области могут быть охарактеризованы некоторыми общими свойствами, которые позволяют классифицировать их общность и выделить их особые (системные) свойства.

1. Технологические системы состоят из разнородных, искусственных, т.е. изготовленных человеком и (или) системой машин, элементов с опреде-

ленными нормированными свойствами каждого из них. Элементы объединены между собой и связаны в определенную структуру.

2. Связность элементов технологической системы определенным образом между собой характеризуется пространственными, временными, функциональными отношениями как отдельных элементов (деталей) между собой, так и образованных из них групп элементов (узлов) между собой.
3. Технологическая система в целом характеризуется особым свойством (качеством), которое не эквивалентно сумме свойств отдельных составляющих эту систему элементов или групп элементов. "Целое — больше суммы его частей" (Аристотель). Такое свойство получило название эмергентность (эмерджентность).
4. Определяющим понятием для технологической (и другого типа) системы является понятие цели (целей) и достижение ее (их) в процессе функционирования системы экстремальным, т.е. наилучшим, образом. Наличие цели "сплачивает" отдельные элементы системы между собой в единое целое.
5. Технологические системы предназначены для превращения исходных свойств предмета обработки — заготовки, сырья — в конечное состояние — деталь, узел, изделие. Начальные и конечные состояния описываются набором размерно-геометрических, физических, химических и других нормированных свойств.
6. Для целенаправленного функционирования технологической системы кроме "физических компонентов" реальной действительности — вещества, энергии, времени, пространства необходима информация о реализации технологического процесса.
7. Технологическая система и ее функционирование задается многочисленными условиями реальной действительности. Ресурсы для функционирования технологической системы всегда ограничены и выражаются (в конечном счете) экономическими критериями. Замена старой технологической системы новой имеет экономический смысл, если новая технологическая система характеризуется лучшими экономическими критериями по сравнению со старой.
8. При выпуске однородной продукции технологические режимы и условия любого технологического процесса подвержены во времени изменчивости. Изменчивость порождает неизбежное случайное рассеивание параметров качества выпускаемых изделий, выражающееся в виде нестационарного случайного процесса.

Анализ свойств технологических систем позволяет сделать следующие выводы.

- Технологические системы характеризуются как сложные системы.

- Технологическая система создает системный эффект взаимодействия факторов — существенное изменение (усиление или уменьшение) свойств элементов системы и системное качество (эмергентность) — появление нового качества, не свойственного ни одному из элементов до включения их в систему.
- Технологическая система должна быть отнесена к разряду кибернетических. Получение необходимой информации о технологической системе может быть осуществлено путем проведения с ней специально организованного эксперимента и представлено в виде системы "черный ящик" (рис. 2.2).
- Для правильного, полного информационного описания технологической системы необходим системный подход, который включает группу факторов, группу критериев качества, проведение с технологической системой специального эксперимента и его соответствие определенному критерию (критериям) качества при ограничении ресурсов на его проведение.
- Количественные свойства нестационарного изменения параметров качества технологической системы могут быть отображены в виде стохастических моделей, а рассеивание — эмпирической гистограммой. По результатам наблюдений с использованием разнообразных статистических методов могут быть определены различные статистические характеристики процесса, позволяющие информационно описывать его состояние, протекание, прогнозирование, определять наилучшие (оптимальные) условия [158, с. 270—272].

Классический период развития науки характеризовался парадигмой "мир устроен просто". Для формализованного описания сложных явлений необходимо было разработать методологический подход [159], аппаратные и вычислительные средства его реализации. Говоря об изучении сложных явлений реальной действительности, английский биокибернетик У.Р. Эшби отмечал: "Движение в этих областях напоминает движение в джунглях, полных ловушек. Наиболее знакомые с этим предметом обычно наиболее осторожны в разговорах о нем" [160, с. 223].

Акад. В.М. Глушков отмечал объективность понятия сложности для систем. "Сложные системы в научном понимании слова являются исключением. Представление о них никакой гений упростить не может... Развитие, действие сложных систем принципиально невозможно описать каким-нибудь десятком теорем и аксиом" [161, с. 13].

Физические и химические процессы, происходящие при обработке металлов резанием, имеют сложный комплексный характер. Так, например, при обработке сталей и титановых сплавов в зависимости от условий резания имеют место адгезионный, абразивный, абразивно-химический, диффузионный виды износа или их комбинации [162, с. 21]. Фактическая картина износа зависит от многих факторов, в том числе, режимов обработки, использо-

вания СОЖ, марки материала режущей части инструмента, обрабатываемого материала. По мнению проф. М.И. Клушина система резания является весьма сложной [20, с. 8]. Технологическая система, "содержащая" систему резания в себе, также весьма сложна.

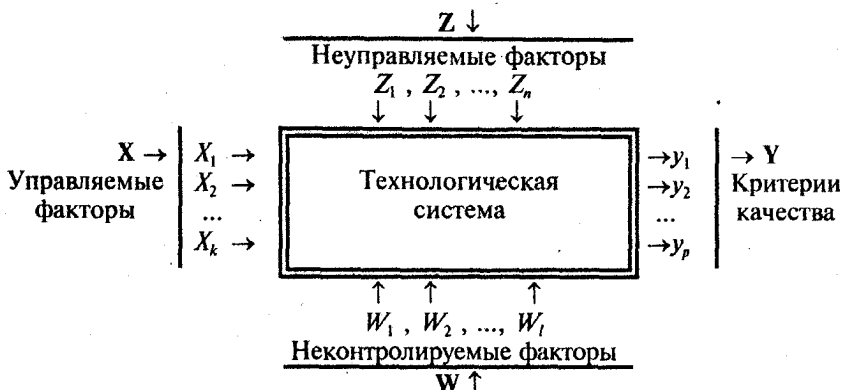


Рис. 2.2. Кибернетическая модель сложной технологической системы

Рассматривая возможность математического описания сложных систем, чл.-кор. Н.П. Бусленко отмечал: "К сожалению, для объектов столь общего вида, каким является управляющая система, вряд ли можно рассчитывать на создание сколько-нибудь обозримого и практически приемлемого математического аппарата, позволяющего изучать свойства сложных систем с количественной точки зрения" [163, с. 7].

Системный подход к анализу и синтезу технологических и технических систем включает единство и борьбу противоположностей: упрощение сложности и ограничение разнообразия при формализованном описании системы с одной стороны — работа исследователя — и значительная сложность, разнообразие возможного проявления свойств, неопределенность состояния системы — свойства реальных систем.

Разработка наилучшего варианта технологического процесса предусматривает решение технических, экономических и организационных задач в конкретных производственных условиях. При этом выбранный технологический процесс должен обеспечить выполнение всех требований к точности и качеству изделия, его изготовление в указанном количестве и в заданные сроки. Разработка с такими требованиями технологического процесса представляет собой сложную задачу и требует системного подхода. Он необходим также при экспериментально-статистической методологии получения информации.

2.8 Принципы синтеза формализованного описания для систем с неполной информацией их содержательных свойств

Ранее было рассмотрено, что технологические системы характеризуются как системы с неполной информацией об их содержательных свойствах. Это приводит к тому, что достаточно полные статистические характеристики как полезной информации, так и погрешностей, сопровождающих ее, неизвестны. Неточная априорная информация вынуждает исследователя искать и применять такие методы математического моделирования (и оптимизации), которые бы обеспечивали незначительную чувствительность метода к условиям задачи. В последние годы в прикладной статистике такие методы получили название "робастные", т.е. устойчивые. Проблема соответствия предположений, принятых для использования математического метода реальным условиям при решении прикладной задачи, является определяющей для выбора метода. Если метод неустойчив к фактическим условиям решаемой задачи, то его потенциальные преимущества не будут реализованы.

Процесс получения математической модели сложной системы включает выбор вида (иначе структуры) этой модели. Некоторые специалисты считают, что указанная задача в значительной мере неопределенная, как и любая задача об аналитическом представлении эмпирических функций [164, с. 440]. Для наиболее важных случаев математического описания реальных сложных систем вид структуры математической модели не известен и практически не может быть заранее сформулирован исследователем исходя из вскрытия механизмов происходящих явлений.

Таким образом, процессу синтеза математического описания свойственна неопределенность в выборе структуры. Учитывая прикладной характер моделирования, весьма желателен выбор такой структуры математической модели, которая помимо числового значения результата должна еще представлять информацию о семантических свойствах моделируемой системы и была бы удобна для интерпретации в прикладных целях.

При синтезе математических моделей по результатам экспериментов с технологической системой необходимо учитывать выполнение предпосылок, на которых базируется этот синтез. Предпосылки должны учитывать необходимые свойства как полезной информации, так и свойства случайных ошибок, неизбежно присутствующих в результатах эксперимента. Получение математических моделей должно базироваться на вероятностно-статистических методах получения полезной информации. Однако принятые предпосылки могут фактически не выполняться. Проверка их в реальных условиях исследования затруднена и в ряде случаев невозможна из-за значительных затрат средств и времени. Поэтому до проведения экспериментов с технологической системой необходимо знать систему действий с исходными данными, если предпосылки не выполняются. Важна также возможность оценки воз-

никающих при невыполнении предпосылок искажений (ошибок) и их следствий.

Рассматривая проблему получения математических моделей, необходимо отметить принципиальное различие в понимании задания точности, используемой аналитической моделью, и данными реальной прикладной системы. В математике задание аналитической функции предлагает точное (без ошибок) ее значение. В исходных данных ограниченного объема и результатах вычислений с этими данными всегда будут присутствовать ошибки: точность реальных вычисленных результатов будет ограничена. Условия получения исходных данных технологических экспериментов и вычисления коэффициентов математической модели должны быть устойчивы.

Между теоретической концепцией аналитических моделей и прикладным моделированием наблюдается несовпадение исходных условий, принципов получения и интерпретации результатов. Анализируя и сопоставляя исходные предположения и принципы, лежащие в основе математических теорем и физических теорий, известный французский физик Л. Бриллюэн приходит к следующему выводу: "...нам нужно сделать упор на фундаментальное структурное различие между математическими и физическими (или химическими и биологическими) теориями. Между обоими методами лежит широкая пропасть, расширяющаяся с каждым днем" [165, с. 60].

Решающему прикладные задачи математического моделирования необходимо успешно преодолеть указанную преграду и удовлетворить искомое решение противоречивым требованиям его формализованного получения, объективности, доступности и практической ценности.

2.9 Основные выводы

Содержательное понимание и представление технологических систем являются основными в практической деятельности рабочего, техника, инженера. Обучение, развитие первичного понимания, получения навыков работы с технологическими системами происходит у будущего специалиста на содержательном (не формальном) уровне. Здесь велика роль наблюдательности, интуиции, интереса к предметной области; на более высоком уровне — таланта в профессиональном овладении специальностью. Однако только содержательное понимание не является достаточным для прогноза, управления, развития технологических систем, поскольку, используя его, нельзя исключить из рассмотрения человека: содержательное понимание не является формализованным. "В развитом сознании современного человека аппарат формального мышления не занимает центрального положения. Это скорее некое "вспомогательное вычислительное устройство", запускаемое в ход по мере надобности" [166]. Таково мнение акад. А.Н. Колмогорова. Переход к формализованному описанию технологических систем необходим для автоматизации управления, более глубокого всестороннего изучения сущности про-

цессов, происходящих в этих системах, исключения содержательного подхода при принятии решений с новыми, не освоенными технологическими системами. Формализованная методология получения новой информации и ее использование в определенной степени исключает принятие решений специалистом на содержательном уровне.

Сформулируем краткие выводы по главе 2.

1. Технологическая система — основное понятие технологического процесса — материально преобразует исходные свойства сырья в конечные потребительские свойства продукции. Как физическая реальность она первична по отношению к последующему информационному ее отображению формальными математическими средствами. Отдельные критерии качества технологической системы связаны между собой принципом Ле Шательера-Самуэльсона.
2. В технологическом производстве занято около 70 % трудоспособного населения. Современные высокопроизводительные технологии обеспечивают 60 % роста эффективности в наилучшем использовании сырья, энергии, времени при производстве изделий. Технологии определяют 70–75 % всех затрат в полной себестоимости продукции. Для перестройки экономики Украины необходимы принципиально новые технологии, наукоемкое производство, выпуск конкурентоспособной продукции.
3. Проблема качества изделий является основной в современном производстве. Особенно значительных успехов по повышению качества продукции добились Япония и США. Число дефектов в японских товарах в 10–70 раз меньше, чем в аналогичных американских. Дефектная продукция в японском производстве составляет десятые и даже сотые доли процента. Высокое качество продукции стало для Японии основной причиной успехов в конкурентной рыночной борьбе. Источником высокого качества продукции стали информационные технологии, исследовательские центры, кружки контроля качества, обучение "технологии качества". Из 100 % мер по обеспечению качества 75 % должны обеспечивать значения показателей качества на этапах конструирования, технологии производства, испытании изделия.
4. Технологическая система описывается значительным числом факторов и десятками критериев качества. Для реальной технологической системы выбор спецификации факторов и критериев качества осуществляется с использованием эвристического и статистического подходов. Полнота и доказательность выбора факторов и критериев качества недостаточны.
5. В зависимости от уровня сложности виды связей между факторами и критериями качества системы могут подразделяться на детерминированные, вероятностные и индетерминированные (адаптивные). Многие исследователи сходятся во мнении, что технологические системы обработки металлов резанием и сборки адекватно описываются вероятностной схе-

мой связи факторов и критериев качества. Однако тип закона распределения, численные значения его параметров для критериев качества прикладной технологической системы часто неизвестны или их значения неустойчивы. В этих случаях система должна быть классифицирована как индетерминированная (адаптивная).

6. Качественно и количественно технологические системы характеризуются неопределенностью состояния и численных значений как факторов, так и критериев качества, т.е. неполнотой информации о содержательных свойствах системы. Оперирование математическими моделями в классической математике происходит на основе закона исключенного третьего: высказывание либо истинно, либо ложно — третьего не дано. Поэтому при использовании математического аппарата и формальных подходов для получения математических моделей необходимо учитывать реальность информационно неопределенности технологических систем.
7. Технологические системы, по мнению всех исследователей, весьма сложны. Сложность системы характеризуется количеством критериев качества и факторов, видом связи между ними; системными свойствами: целенаправленностью, эффективностью, эмергентностью, функциональностью, целостностью, неопределенностью, иерархичностью, оптимальностью, сложностью, стохастичностью и другими (всего до 40 наименований). Статус прикладной технологической системы не соответствует методологии номографического изучения "простых" ("моно") процессов, объектов, явлений весьма типичной для классической физики, механики, химии.
8. При изучении технологических систем необходим системный подход, включающий многокритериальность, многофакторность, экспериментально-статистическую концепцию получения полезной информации, эффективность проведения исследований. Необходимо разработать прикладную технологию многофакторного математического моделирования технологических систем с соответствующим алгоритмическим, эвристическим и программным обеспечением.
9. Формализованное описание технологической системы базируется на принятых предположениях. Однако фактические свойства как полезной информации о системе, так и случайных ошибок результатов экспериментов с технологической системой могут не соответствовать принятым. Ввиду типичности такого положения для прикладного моделирования технологических систем необходимо использовать методы последовательного получения уравнения регрессии и, если необходимо, последовательного проведения эксперимента; устойчивого (робастного) выделения структуры уравнения регрессии и оценки его коэффициентов.

Глава 3 Формализованное описание технологических и технических систем

Одна из первых в мире работ по математическому моделированию обработки деталей резанием на металлорежущих станках была проведена с 1880 по 1905 г. американским инженером Ф.У. Тейлором. Целью исследований было провести в механической мастерской наиболее дешевым способом возможно большее количество работы лучшего качества [88, с. 36]. После 26 лет работы было установлено, что ответ на эти вопросы в каждом отдельном случае предполагает разрешение сложной математической задачи, где приходится определить совместный эффект 12 независимых переменных [87, с. 78].

Реализация современных принципов создания технологических систем и их совершенствование предполагают получение математических моделей технологических процессов. Сложность построения моделей определяется степенью изученности технологического процесса и их необходимой точностью. Сам процесс составления формализованного описания технологической системы является неформальным, и в нем решаются непростые задачи. Помимо выбора и постановки содержательной задачи необходимо установить для ее решения соответствующие математические методы и подходы, ограничить содержание задачи в предметной области, сформулировать содержание и последовательность составления математических моделей технологической системы.

В построении математических моделей технологических процессов различают следующие этапы.

1. Изучение технологического процесса.
2. Составление содержательного описания предметной области.
3. Составление формализованной последовательности получения математической модели. Оснащение математическим, эвристическим и программным обеспечением.
4. Получение исходных данных, построение, проверка и интерпретация модели технологического процесса.

Математическое моделирование технологических систем приблизительно описывает существенные содержательные стороны технологической системы. Основными критериями моделирования являются правильность, своевременность, экономичность затрат, доступность для использования, возможность применения для рассматриваемого класса технологических систем. Обязательность выполнения всех требований предполагает поиск оптимальных подходов и методов, положенных в основу решения задач, которые возникают не как чисто математические, а как прикладные, т.е. вне математики [167, с. 34–35].

Акад. А.А. Самарский отмечал, что "вопросы технологии находятся сейчас в центре внимания. ... Задачи технологии (как правило, многопараметрические) часто оказываются сложнее задач ядерной физики, физики плазмы, космонавтики" [59, с. 4].

Учитывая сложность формализованного решения технологических задач, технологические системы можно описывать только на основе аппроксимации. Рассматривая решения математических проблем в чистой и прикладной математике, Р. Курант обращал внимание на то, что "...в прикладной математике доминируют аппроксимации (приближения) — без них невозможно обойтись при переносе реальных физических процессов на математические модели" [168, с. 27].

Многие ученые считают проблему математического моделирования приоритетной в информационном обеспечении решения задач машиностроения. По мнению акад. В.П. Маслова, математическое моделирование должно пронизать всю нашу жизнь [169, с. 27]. Возможные последствия любых крупных решений мы обязаны проигрывать на моделях. В большинстве стран математическое моделирование — серьезнейшее научное направление, щедро финансируемое государством и частным бизнесом.

Акад. А.А. Самарский рассматривал математическое моделирование как основной путь ускорения научно-технического прогресса, единственный радикальный путь ускорения, методического обновления науки. Он отмечал также методологическую широту, междисциплинарность математического моделирования, возможность решения разнообразнейших задач [170, с. 21]. Одна из приоритетных проблем — использование математических расчетов для совершенствования технологических процессов машиностроения, так как значительные планы по машиностроению не могут быть выполнены с помощью прежней методологии [17, с. 25].

По мнению акад. В.С. Пугачева, в математике в первую очередь необходимо создание прикладных методов исследований с использованием современной вычислительной техники [171, с. 26].

Рассматривая вопросы методологии теории обработки металлов резанием, проф. М.И. Клушин пришел к выводу, что "основной задачей теории обработки резанием является разработка математических моделей как отдельных частных закономерностей, так и в целом всей системы резания" [20, с. 8].

Успех формализованного описания определяется используемыми методом, эвристическими рекомендациями, вытекающими из них алгоритмами и программным обеспечением. Используемое информационное обеспечение определяет судьбу исследования.

3.1 Формализованное описание объективной реальности на основе принципа аппроксимации

Аппроксимация (лат. — "приближаюсь") представляет замену более сложных математических объектов другими, в определенном смысле близкими к первым, менее сложными и более удобными в работе. Аппроксимация используется в различных разделах математики как общий методологический подход к получению приемлемых решений. Аппроксимация обычно используется и при изучении сложных объектов, процессов, систем.

Известный специалист в области прикладной математики и общей механики акад. Н.Н. Моисеев считает, что аппроксимация реальных и очень сложных режимов и связей более простыми играет огромную роль в практике использования формализованного описания [172, с. 46].

По мнению английского кибернетика и психиатра проф. У.Р. Эшби, "когда системы становятся сложными, то их теория практически заключается в том, чтобы найти пути их упрощения... Исследователи сложных систем должны заниматься упрощенными формами, ибо всеобъемлющие исследования бывают зачастую совершенно невозможны" [173, с. 78, 83].

Английский философ, логик, математик проф. Б. Рассел считал, что процесс научного познания неизбежно имеет приближенный характер, так как вся наука основана на идее аппроксимации [174, с. 7].

При формализованном описании систем аппроксимация необходима, так как значительную долю актуальных задач в технике, физических исследованиях трудно решить, следуя логике строгих решений.

Рассматривая развитие научных основ технологии машиностроения и применения ЭВМ в технологическом проектировании, проф. В.С. Корсаков считал необходимым переход от приближенных описаний происходящих явлений в технологических процессах на уровне качественных объяснений к математически строгим выражениям, понятиям и методам современной науки. Сложные процессы могут быть представлены аппроксимирующими математическими моделями [108, с. 7–8].

Формализованное описание технологических систем осуществляется на основе модельных аппроксимирующих допущений. В качестве математического инструмента аппроксимации используется метод наименьших квадратов. Численные значения коэффициентов многофакторных математических моделей определяют путем аппроксимации исходных данных, полученных по специально организованному многофакторному эксперименту. Матрицы планирования экспериментов соответствуют принятым критериям информационной оптимальности (или квазиоптимальности). В качестве класса математических моделей, предлагаемых для оценки значений коэффициентов, принимается класс линейных относительно независимых параметров моделей. Структурная группа коэффициентов задается структурой полного факторного эксперимента, полученной путем произведения полиномов, каждый из

которых по предположению адекватно описывает влияние изучаемого фактора на определенный критерий качества.

Технологические системы весьма сложны, поэтому аппроксимация как методологический прием неизбежна. Точность ее должна быть оптимальна: используемые модели должны быть адекватны результатам экспериментов. Отсюда следует, что среднеквадратичная погрешность результатов экспериментов является мерой для выбора точности аппроксимации. Аппроксимация должна быть формализованной, объективной, на количественной основе. Конечная цель аппроксимаций — математические модели.

Разработка строгих, т.е. объективных, методов формализации технологических систем, удобных в качественном и количественном смысле для практики, является основным направлением развития точных методов в технологических исследованиях. Оптимальная или, если она затруднена, то рациональная аппроксимация стала основной познавательной процедурой. Увеличение сложности технологических и технических систем ориентирует методологию аппроксимации все к более строгой логике познания: сочетание полноты и объективности познания прикладных систем с вынужденным упрощением методологии познания.

3.2 Проблема структурной связи факторов с параметрами качества машин

Структура, т.е. строение, расположение, сложной системы понимается как определенная взаимосвязь подсистем, взаимное расположение ее составных частей; совокупность устойчивых связей частей системы, обеспечивающих ее целостность и сохранение основных свойств в процессе функционирования и, следовательно, неизбежных внешних и внутренних изменениях.

Свойство эмергентности сложных систем предопределяет необходимость изучения технологической системы как единой целой реальной действительности. Однако при изучении целого недостаточно только количественной определенности, выражающейся в полноте набора частей (подсистем) технологической системы, так как их внутренняя связь между собой и взаимодействие в явном виде не проявляются. Проявление функционирования системы выражается и конкретизируется в структуре параметров, которые определяют системные свойства технологической системы.

В определениях термина "система", данных Ст. Биром [63, с. 22], Л. Берталанфи [175, с. 29], О. Ланге [176, с. 196], Р. Акофом [177, с. 69], А. Рапортом [178, с. 88], В.П. Кузьминым, Ф. Ханика [179, с. 23], П.К. Анохиным [180, с. 33] утверждается, что элементы (части, компоненты, единицы) системы связаны, взаимодействуют, взаимосвязаны, совокупно относятся, взаимоотносятся, взаимодействуют между собой. Это свойство элементов, входящих в систему, является одним из важнейших для интер-

претации понятия система и требует соответствующего отображения в математических моделях в виде взаимодействий факторов. Раскрытие их в моделях и будет объективно представлять структуру параметров технологических процессов механической обработки деталей и сборки машин.

Структурные связи параметров технологического процесса определяют группу критериев качества. Решения разнообразных задач технологических процессов требует отображения технологической реальности в формализованные понятия — многофакторные математические модели, удобные для использования на ЭВМ.

Под структурой технологических процессов в широком смысле следует понимать и параметры (условия) технологического процесса, выраженные в виде комплекса многофакторных математических моделей, структурно (качественно) и количественно описывающих информационные связи между исходными условиями, режимами обработки деталей и сборки машин (факторами) и критериями качества технологического процесса.

Математическая модель должна представлять сущность технологического проявления в виде определяющих параметров и присущей им структуры. Структура модели должна быть необходимой и отображать устойчивые (в отличие от случайных) связи параметров технологических процессов. Так как в преобладающем большинстве сложные системы нелинейны, то структура должна отображать как аддитивные, так и мультипликативные составляющие параметров. Мультипликативные отображают взаимодействия факторов (параметров) и характеризуют свойство эмергентности системы.

Создание и практическое использование методологии получения количественного описания протекания технологических процессов посредством математического моделирования проф. В.С. Корсаков относил к одному из главных направлений развития технологии машиностроения [43, с. 413]. Ее развитие, совершенствование и обобщение формирует межатраслевую теорию алгоритмизации технологических процессов, которая, по мнению акад. И.И. Артоболевского, может привести во многих случаях к революционным сдвигам в самых различных областях современного производства [37, с. 3].

В специальных изданиях по технологии машиностроения — монографиях, учебниках, статьях — весьма редко можно найти изложение вопросов методологии получения математических моделей технологических процессов. Просмотр и анализ учебников для вузов, втузов и техникумов [23, 36, 38, 43, 106, 181—186] показал, что о методологии получения математических моделей, проведении исследовательских технологических экспериментов в них не говорится. Наиболее близко к описанию этой методологии подошел проф. А.Н. Гаврилов [38]. Однако систематическое ее изложение в указанной работе отсутствует. В учебнике проф. А.А. Маталина [36] — наиболее полном, современном и совершенном — эта методология не описана.

Выбор способа формализованного описания сложных технологических систем определяется поставленной задачей. Прикладная постановка

цели исследования предъявляет повышенные требования к возможности и качеству решения задачи: необходимые затраты ресурсов для его получения, адекватность описываемой системы, достаточная надежность, семантическая полученность моделей, доступность использования полученных решений и др.

Исторически сложились два подхода к формированию структуры математических моделей при описании объектов и явлений реальной действительности. В работах автора впервые они были рассмотрены в 1970 г. [187].

3.2.1 Установление структурной связи на основе содержательного анализа и вскрытия механизмов происходящих явлений

Процесс математического моделирования начинается с содержательного описания системы (или процесса, объекта) с выделением наиболее важных факторов и критериев качества.

Формирование математической модели начинается с содержательного анализа механизма происходящих явлений с использованием физических, механических, химических и других превращений, вытекающих из взаимодействий факторов. Содержательная картина явления формализуется и визуализируется в виде упрощенного рисунка (схемы). Для рассматриваемого процесса (явления) составляется его формализованное отображение в виде первичной (элементарной) математической модели. Устанавливаются ограничения в виде рассмотрения этого процесса как однофакторного или многофакторного, однокритериального или многокритериального и др.

Устанавливается общий метод или схема получения математической модели, математический аппарат, необходимый для решения задачи. Формулируются начальные количественные условия для интервалов и области существования факторов. Начальное формализованное отображение первичной математической модели обобщается (или интегрируется) и получается итоговый вид модели (закономерности).

Изучение процесса проводится качественными и количественными методами. Обычно используется теоретико-аналитическая концепция. При схематизации и формализации процесса неизбежны упрощения, идеализация.

Процесс составления математической модели не формализован, требует практического опыта составления подобных моделей, неформальных (эвристических) принятых решений. Многолетние попытки использования указанного подхода для получения математических моделей технологических систем показали слабую эффективность решения задач: такие критерии качества, как износ инструмента, точность обработки, стойкость режущего инструмента, шероховатость обработанной поверхности, сила резания и крутящий момент и некоторые другие, не имеют удовлетворительных для прикладных целей математических моделей.

3.2.2 Формализованный поиск структурной связи на основе аппроксимации исходных данных технологической системы, полученных по плану эксперимента

Поиск структурной связи факторов с параметрами качества машин базируется на теореме Вейерштрасса о возможности как угодно близкой аппроксимации произвольной действительной непрерывной в многомерном пространстве R^k на многомерном параллелепипеде $[a_i, b_i]$, $i = 1, \dots, k$ функции $y_j = f_j(X_1, \dots, X_k)$, не имеющей особых точек, последовательностью алгебраических многочленов $P_q(X_1, \dots, X_k)$, $q = 0, \dots, s_j$, равномерно сходящихся на $[a_i, b_i]$ к функции $y_j = f_j(X_1, \dots, X_k)$.

В качестве исходных данных для аппроксимации используют результаты проведенных технологических экспериментов, полученные методом статистических испытаний (метод Монте-Карло), а также результаты трудоемких вычислений на ЭВМ, экспертные оценки.

Первоначально формулируют содержательную и формализованную постановку задачи. Производят сбор и анализ априорной информации об объекте исследования.

Выбирают критерии качества машины (если необходимо — и технологической системы), характеризующие близость моделируемого объекта к сформулированной цели, и управляемые факторы, влияющие на критерии качества. Проводят классификацию критериев качества и факторов. Анализируют область совместного существования управляемых факторов и определяют вид области; назначают интервалы изменения и число уровней по каждому фактору; формулируют необходимость разбиения плана эксперимента на ортогональные блоки.

Определяют критерии оптимальности для плана проводимого эксперимента. Осуществляют поиск и выбор плана эксперимента, удовлетворяющего выбранным критериям. Намечают возможность выбора последовательности планов эксперимента, если полученная по первоначальному плану эксперимента математическая модель не будет адекватна.

Поиск структурной связи критериев качества и управляемых факторов осуществляют из множества эффектов, соответствующих множеству эффектов схемы полного факторного эксперимента, которая задается выражением:

$$(1 + X_1 + X_1^2 + \dots + X_1^{s_1 - 1}) \times \dots \times (1 + X_k + X_k^2 + \dots + X_k^{s_k - 1}) \rightarrow N_{\Pi}, \quad (3.1)$$

где X_1, \dots, X_k — факторы искомой математической модели;

s_1, \dots, s_k — число уровней факторов X_1, \dots, X_k ;

k — общее число факторов;

N_{Π} — число опытов полного факторного эксперимента, равное числу структурных элементов его схемы.

В общем случае из-за значительного числа опытов реализация полного факторного эксперимента не представляется возможной. Оценку коэф-

коэффициентов модели в большинстве случаев проводят по исходным данным дробного факторного эксперимента. Поиск необходимых эффектов для исходной модели осуществляется как многократная статистическая проверка гипотез о статистической значимости главных эффектов и различных взаимодействий факторов. В математическую модель вводят статистически значимые эффекты. Для выполнения требования устойчивости коэффициентов модели необходимо также, чтобы все они были не сильно закоррелированы друг с другом: величина коэффициентов парной корреляции (по модулю) должна быть не более 0,3—0,4.

Полученную математическую модель проверяют на адекватность, информативность, устойчивость коэффициентов, эффективность извлечения полезной информации из исходных данных и по другим критериям. Делают вывод о достаточности формирования структуры модели или необходимости продолжить ее формирование.

Окончательный вариант математической модели анализируют по критериям объективности, результативности, семантической.

Проблема формирования структурной связи факторов и параметров качества машин сложна и ответственна. Ввиду сложности технологических и технических систем возрастает необходимость использования математических методов исследования. При правильном и эффективном использовании математических методов они становятся естественной частью исследования и органически дополняют содержательную часть описания технологической системы. Например, в расчетной схеме суммарных упругих перемещений обрабатываемой зажатой заготовки в системе патрон—деталь используется детерминированный подход [188, с. 152—154].

Предложенное выражение (3.1) для поиска структурной связи критериев качества и факторов может быть использовано для моделирования и анализа технических систем, например, структурных схем высокоточных зажимных патронов [188, с. 149—151].

Известно, что технологические условия обработки деталей машин и их сборки определяют качество изделий. При этом вопросы технологической наследственности и ее влияния на эксплуатационные характеристики становятся определяющими. Целенаправленное использование технологической наследственности может быть реализовано посредством получения математических моделей, связывающих эксплуатационные характеристики деталей (усталостная прочность, износостойкость и др.) с их режимами обработки.

Таким образом, конкретные системные (многокритериальные, многофакторные) связи в инженерной постановке можно установить только на основе многофакторных математических моделей, полученных экспериментально—статистическими методами.

3.3 Преимущества и недостатки первого и второго подходов, их возможности при формализованном описании сложных систем

Известны два подхода в изучении реальной действительности: онтологический — путем вскрытия механизмов происходящих явлений; феноменологический — путем исследования внешнего проявления работающей системы и построения модели ее функционирования по результатам наблюдений.

Указанные подходы характеризуются различными возможностями по критериям сложности и точности получения математических моделей. Теоретико-аналитический подход и вскрытие механизмов, происходящих в системе явлений, позволяют получить сравнительно грубые и несложные модели. Математики отмечают, что для более точных и сложных моделей аналитические решения удается получить сравнительно редко и основными методами решения являются численные с проведением расчетов на ЭВМ [189, с. 14].

Д.т.н. Н.А. Бородачев считал, что получение математических операторов преобразующих систем рабочих процессов должно делаться путем инженерного и физического анализа и синтеза основных элементов этих систем, а не путем использования метода "черного ящика" [134, с. 15].

Практика многочисленных прикладных исследований, проведенных после 1959 г., показала ошибочность такого мнения. В области использования статистических методов в исследованиях технологических процессов обработки материалов резанием к.т.н. П.Г. Кацев (ВНИИ, г. Москва) пришел к выводу, что "установить количественные зависимости между параметрами процесса на основе только качественных исследований физики процесса невозможно. Учитывая статистический характер реальных производственных процессов, необходимые зависимости и связи могут быть определены на основе применения математико-статистических методов. Последние позволяют получить многофакторные зависимости при неполном знании механизма процесса (кибернетический принцип "черного ящика")..." [190, с. 36].

К аналогичному выводу пришел и проф. А.М. Вульф: "Попытки теоретического расчета износа при помощи единой формулы не увенчались успехом. Этому препятствует чрезвычайная сложность процесса резания, на течение которого влияет очень много параметров в самых разнообразных сочетаниях (некоторые исследователи насчитывают свыше 13 млн. сочетаний)" [191, с. 183].

Ведущий специалист в области лазерных технологических процессов проф. В.С. Коваленко пришел к выводу, что теоретические зависимости не пригодны для использования в практических условиях. Это довольно остро ставит проблему разработки инженерных методов расчета и оптимизации режимов технологических процессов [192, с. 73, 74]. В качестве инженерных методов при изучении технологических процессов лазерной обработки в машиностроении используются многофакторные математические модели и

экспериментально-статистический подход при получении таких моделей [193, с. 10–26, 46–63].

Известно, что стойкость режущих инструментов при проведении технологических исследований относят к наиболее важным критериям качества. Причины трудностей теоретического установления зависимостей стойкости инструмента следует видеть в системном влиянии многих факторов — конструктивных, технологических, режимных — при которых стойкость инструмента зависит не только от значения какого-либо фактора, но и от значений других факторов. Системное влияние факторов описывается взаимодействиями факторов, которые практически трудно установить путем теоретико-аналитического подхода и вскрытия механизмов происходящих явлений.

А.А. Грудов в работе [194], которая вышла под редакцией д.т.н. проф. Г.И. Грановского, пришел к выводу, что при теоретическом получении с физических позиций общей формулы стойкости режущего инструмента T возникает ряд трудно преодолимых препятствий: за вековую историю учения о резании были предприняты лишь две попытки, которые "не смогли вскрыть всю внутреннюю совокупность взаимосвязанных факторов, от которых в конечном счете зависит стойкость T " [194, с. 8].

По наблюдениям зарубежных специалистов, отечественной научной парадигме часто свойственно увлечение теорией без проверки ее на практике [195, с. 3; 196, с. 5]. Именно этим и можно объяснить прикладную неэффективность некоторых теорий и разработок, претендующих на научные в технологических исследованиях.

Другая широко распространенная догма в технологических исследованиях — построение теоретических моделей на основе изучения физических закономерностей и их широкое использование при параметрической оптимизации. Полученные таким способом математические модели будут слишком упрощены, а найденные на их основе оптимальные условия не будут достаточно адекватно и эффективно отражать реальные технологические системы и процессы. Акад. Н.Д. Кузнецов отмечает, что в современных сложных системах, таких как авиадвигатель, технология его изготовления, "имеются показатели, которые либо не поддаются расчету, либо рассчитываются с недостаточной достоверностью" [155, с. 53, рис. 2]. В таких весьма типичных ситуациях использовать теоретико-аналитический подход в формировании математических моделей не представляется возможным.

Однако в арсенале многофакторной и многокритериальной оптимизации сложных систем имеются достаточно эффективные методы нахождения оптимальных условий без получения самих математических моделей.

Ответ на поставленный вопрос можно получить, если переосмыслить понятие "изучение сложной системы". Достаточно полное описание, позволяющее учесть почти всё множество явлений, происходящих в технологической системе, на основе физического рассмотрения для систем такой сложности практически трудно достижимо. Необходимо разумное упрощение на

основе понятий аппроксимации и метода "черного ящика". Попытка идти более сложным путем неизбежно потребует значительных временных, материальных и интеллектуальных затрат, что практически приведет к запозданию решению либо и вовсе к его отсутствию.

Акад. И.М. Гельфанд и М.Л. Цейтлин еще в 1962 г. обращали внимание на неэффективность использования традиционных методов исследования при изучении сложных систем, так как предлагаемые там алгоритмы, формально позволяющие решить задачу, часто оказываются практически неприемлемыми [197, с. 5].

Значительная сложность реальных технических и технологических систем предопределяет необходимость использования всемерных упрощающих подходов и, в частности, модели "черного ящика". "Кибернетика дает нам надежду на создание эффективных методов для изучения систем чрезвычайной внутренней сложности и управления ими. Эта задача будет решена кибернетикой, когда она выделит то, что достижимо (ибо, вероятно, большинство из исследователей прошлого стремилось достичь невозможного), и затем создаст обобщенные стратегические приемы, достаточно обоснованные и допускающие единообразное применение к разнообразным частным случаям" [198, с. 20].

В настоящем исследовании предпринимается попытка создания указанной У.Р. Эшби методологии: универсальной, обоснованной, эффективной — по достижению целей и по получаемой информации, доступной для прикладного использования [199].

В кибернетике получение математических моделей с использованием модели "черного ящика" является приоритетным и общепризнанным. Такие модели следует рассматривать как функциональное кибернетическое моделирование. И в прикладном, и в теоретическом отношениях наиболее важна возможность замещения оригинала системы, процесса, объекта математической моделью с целью изучения, управления, прогноза поведения и решения других задач. Использование при этом вычислительной техники позволяет просчитывать различные задачи и имитировать различные ситуации обычно во много раз быстрее и дешевле, чем проведение эксперимента на реальных технологических системах. В итоге исследователь получает новую информацию об оригинале — системе, которую представляет полученная модель.

Отметим два момента в случае успешной реализации такого подхода. К математической модели предъявляются многочисленные критерии качества. Поскольку одновременно их выполнить трудно, требуется системная организация и проведение как технологического эксперимента, так и процесса получения модели. Если многочисленные проверки по различным критериям указывают на положительные свойства модели и, следовательно, на факт ее получения, то модель, будучи результатом феноменологического (иначе функционального) подхода, отражает временные и причинно-следственные отношения между входами (матрица управляемых факторов X) и выходами

(матрица критериев качества Y) "черного ящика" (моделируемой технологической системы) без (в общем случае) однозначного отражения структуры технологической системы.

Онтологическое представление структуры моделируемой технологической системы практически сложно и в разумные (в прикладном смысле) сроки не достижимо. Поэтому необходимо получить такие феноменологические модели, структура которых представляет семантическую (смысловую в терминах технологии машиностроения) информацию о структуре самой моделируемой системы. Разработка методологии кибернетического моделирования сложных систем представляет собой программу практических действий в изучении технологических систем в ближайшем будущем. Исторический опыт, теория и практика поиска методов решения проблем показывают, что новым задачам должны соответствовать новые методы их решения.

3.4 Принципы получения линейных относительно параметров полиномиальных математических моделей (в вещественном евклидовом пространстве)

Из предшествующего изложения можно заключить, что использование регрессионного анализа для получения математических моделей является основным подходом в формализованном описании технологических и технических систем.

Регрессионный анализ — раздел математической статистики, объединяющий теоретические методы исследования регрессионной зависимости между величинами по статистическим данным. Регрессия — зависимость среднего значения какой-либо случайной величины от некоторой другой величины или от нескольких величин [200].

Регрессионный анализ входит составной частью в многомерный статистический анализ — раздел математической статистики, посвященный математическим методам построения оптимальных планов сбора, систематизации и обработки многомерных статистических данных, направленным на выявление характера и структуры взаимосвязей между компонентами исследуемого многомерного признака и предназначенным для получения научных и практических выводов [201]. Все специалисты считают регрессионный анализ основным методом математической статистики. Он широко используется в научных и прикладных исследованиях в разнообразных сферах человеческой деятельности. Однако решение прикладных задач "регрессионного анализа и интерпретация его результатов требуют глубоких знаний и умения правильно оценивать получаемую информацию" [202, с. 13].

Проф. Дж. Тьюки утверждает, что множественный регрессионный анализ является основным методом статистики, знание которого при обработке данных совершенно необходимо. "В то же время не стоит полагать, что очень легко овладеть этим методом настолько, чтобы свободно пользова-

ся им на практике, принимая все необходимые меры предосторожности для избежания ошибок" [203, с. 670].

Использование регрессионного анализа как метода переработки информации и получения ее нового представления будет эффективным, если эта переработка проводится с наилучшим использованием ресурсов. Поэтому реализация регрессионного анализа требует системного подхода и оптимального конструирования системы переработки информации.

О трудностях использования регрессионного и корреляционного анализов в технике и науке и проведении при этом вычислений на ЭВМ говорят зарубежные специалисты Н. Джонсон и Ф. Лион: "Тем, кто понимает суть регрессии и корреляции, советы не нужны. Тем, кто не понимает, никакие советы не помогут" [204, с. 500].

Глубокие причины "парадоксальных" и явно "закоррелированных" утверждений известных зарубежных специалистов заключаются в том, что множественный регрессионный анализ — это наука, но она становится еще и искусством, когда ее применяют не в абстрактных условиях чистой математики, а в системной практике реальной действительности.

При определении математических моделей $\hat{y} = f(X_1, \dots, X_k)$ с использованием экспериментально-статистического подхода исследователь должен выбрать класс моделей, в котором будет проведена аппроксимация исходных данных, полученных после проведения технологического эксперимента. Все возможные типы моделей обычно подразделяются на два класса: модели, линейные относительно независимых параметров, и модели нелинейные, т.е. нелинейные по параметрам.

Модели, линейные относительно параметров, имеют вид

$$\hat{y} = b_0 + b_1 f_1(X_1) + b_2 f_2(X_2) + \dots + b_k f_k(X_k) + \dots + b_{k+1} f_{k+1}(X_i, X_j) + \dots + b_{k+2} f_{k+2}(X_i, X_j, X_l) + \dots + b_{k+3} f_{k+3}(X_1, X_2, \dots, X_k), \quad (3.2)$$

где b_0, b_1, \dots, b_{k+3} — коэффициенты математической модели;

X_1, X_2, \dots, X_k — управляемые факторы;

k — число факторов, $1 \leq i < j < l \leq k$;

f_1, f_2, \dots, f_{k+3} — некоторые функции от управляемых факторов X_1, X_2, \dots, X_k .

Примером нелинейных относительно параметров моделей могут быть степенные модели, предложенные Ф.У. Тейлором и используемые в разнообразных технологических исследованиях. Получение нелинейных моделей сопряжено со значительными методологическими и вычислительными трудностями. В аналитическом обзоре программного обеспечения по статистическим методам обработки данных СП "Интерквадро" обращает внимание на то, что задачи нелинейной регрессии требуют большой тщательности в формулировке и интерпретации результатов, так как при использовании нескольких различных методов аппроксимации, отличающихся вычислительной эф-

фективностью, получаются весьма различные результаты. "Все, что мы можем сказать о нелинейной регрессии: не используйте ее, особенно без помощи статистика" [205, с. 32].

Причинами различных результатов является неустойчивость вычислительных процедур определения коэффициентов, которая порождается коррелированностью определяемых коэффициентов и многоэкстремальным характером поверхности, выражающей сумму квадратов отклонений при поиске коэффициентов математической модели.

Из приведенного можно заключить, что даже если выбор нелинейной по структуре модели будет весьма обоснованным, то сложности в определении коэффициентов могут свести на нет общий успех решения задачи. Выбранный Ф.У. Тейлором и получивший значительное распространение в технологических исследованиях нелинейный (степенной) вид модели не имеет до сих пор какого-либо обоснования. Линейный относительно независимых параметров вид модели для аппроксимации результатов технологических экспериментов теоретически обоснован (теорема Вейерштрасса), а процедура вычисления коэффициентов при условии возможности планирования эксперимента обычно не создает существенных вычислительных трудностей.

Рассмотрим технологическую систему, которая описывается факторами X_1, X_2, \dots, X_k . Для каждого фактора укажем отрезок (сегмент) его существования $X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max}$, $i = 1, \dots, k$. Под областью совместного существования факторов, если она не оговаривается особо, будем подразумевать многомерный параллелепипед. При определенных сочетаниях значений факторов X_i проводят N различных экспериментов и получают y_1, y_2, \dots, y_N результатов проведенных технологических экспериментов. Каждый эксперимент может быть повторен n раз. Число опытов, соответствующих схеме полного факторного эксперимента, обозначим N_{Π} , а дробного факторного эксперимента — $N_{\text{д}}$.

Будем считать, что структура математической модели исследователю не известна. Для определения коэффициентов модели $b_0, b_1, \dots, b_k, \dots, b_{k+3}$ используется метод наименьших квадратов.

Получение линейных относительно параметров полиномиальных математических моделей основано на представлении вектора результатов технологических экспериментов $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_N$ в виде линейной комбинации элементов главных эффектов и взаимодействий факторов, которые в общем виде представляются выражением (3.1), соответствующим множеству эффектов схемы полного факторного эксперимента. Выражение (3.1) используется для создания системы базисных функций. Оно представляет собой совокупность всех многочленов факторов X_1, X_2, \dots, X_k каждый степени от 1 до наивысшей $s_i - 1$ и различных взаимодействий этих факторов (точнее степеней этих факторов) по два, три и т.д. до максимально возможных взаимодействий из k различных элементов. Совокупность всех указанных элементов образует вещественное евклидово пространство.

Получение линейной математической модели относительно параметров X_i сводится к представлению вектора результатов технологических экспериментов $\bar{Y}(\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_N)$ в виде линейной комбинации указанных множителей (рис. 3.1).

Система линейных уравнений метода наименьших квадратов при ее решении не может содержать более чем N неизвестных коэффициентов b_{ij} . Максимально возможное число коэффициентов b_{ij} равно N_{Π} . В общем случае $N = N_{\text{д}} < N_{\Pi}$ и, следовательно, необходимо из N_{Π} возможных базисных функций выбрать k' ($1 \leq i' \leq k'$) для получения искомой математической модели.

3.5 Устойчивость математического моделирования технологических систем к малым отклонениям от принятых предпосылок формализованного описания

Технологические и технические системы независимо от уровня защиты подвергаются в определенной степени внешним и внутренним возмущениям, иначе нерегулярным влияниям: силовым, тепловым, электрическим, магнитным и др. Мы должны признать принципиальную стохастичность нашего мира: объект, система, процесс не могут изучаться вне воздействия таких возмущений [206, с. 48–49]. Следовательно, эти возмущения должны учитываться в методологии решения задачи и получаемых математических моделях. Обычно такие возмущения учитываются и выражаются обобщенно в виде дисперсии воспроизводимости результатов эксперимента $s_{\text{ош}}^2$.

Характеризуя ошибки в реальных системах, Ст. Бир писал, что ошибка не бедствие, а естественная и важная часть постоянного поведения системы [63, с. 133].

Классическая математика при постановке и решении задач предлагает концепцию "точности": и исходные данные, и проводимые вычисления не содержат ошибок. Высокая (бесконечно высокая) точность основывается на математической абстракции потенциальной осуществимости, состоящей в отвлечении от возможных пространственных, временных и материальных препятствий к построению конструктивного объекта. Акад. А.Н. Тихонов показал, что многие новые приложения не укладываются в названную выше концепцию и что она не является универсальной [207, с. 11].

Аналитическая модель, рассматриваемая с позиций теоретической математики, не тождественна реальной технологической системе, так как последняя имеет ограниченную точность результатов. Модель, задаваемая аналитически, предлагает точные значения для набора факторов. Это необходимо учитывать при использовании модели. При решении прикладных задач применяемый математический аппарат не может улучшить приближенные исходные данные и тем более допущения, не подтверждающиеся фактиче-

ски. Точность математического решения не превышает исходных предпосылок, которые оно использует.

Получение математических зависимостей по косвенным измерениям (что типично для системных прикладных задач) всегда связано с решением некорректно поставленных (неустойчивых) задач.

Сложность и специфичность решения математических задач с неточными исходными данными заключаются в том, что реализация решения на современных ЭВМ в рамках классических методов не гарантирует устойчивых результатов. Акад. А.Н. Тихонов считает, что "устойчивые математические методы решения неустойчивых задач с неточными данными относятся к классу математических задач, выходящих за пределы классической математики" [208, с. 94].

Проблема устойчивости при решении задач с неточными исходными данными относится к рассмотрению условий корректности. Задача считается корректной, если выполняются следующие условия.

1. Задача имеет решение при любых допустимых исходных данных (существование решения).
2. Каждой совокупности исходных данных соответствует только одно решение (единственность решения).
3. Малым исходным изменениям условий задачи соответствуют малые изменения результата решения (решение устойчиво).

Если не удовлетворяется хотя бы одно условие корректности, то задача называется некорректно поставленной или некорректной.

При решении неустойчивых задач сравнительно малой исходной погрешности δx соответствует весьма большая выходная погрешность δy . Полученное решение не будет соответствовать искомому. Применять к решению неустойчивой задачи численные методы неэффективно: погрешности решения будут увеличиваться в ходе вычислений.

Устойчивость при вычислении коэффициентов многофакторного уравнения регрессии и единственность полученного решения связана с разложением вектора результатов $Y^T = (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_N)^T$ в неортогональном базисе. В теоретической математике различные векторные пространства одной и той же размерности n принципиально не различаются независимо от свойств базиса, например, ортогональный или неортогональный базис, так как единственной характеристикой конечномерного векторного пространства является его размерность. "По своей алгебраической структуре все n -мерные векторные пространства совершенно одинаковы" [209, с. 72].

Кроме общего утверждения о равноправности всех базисов в аффинном (линейном) пространстве акад. И.М. Гельфанд обращает внимание на существенную особенность одного из возможных базисов — ортогонального. Его роль и значение аналогичны прямоугольным системам координат в аналитической геометрии [210, с. 38]. В прикладных задачах ортогональные базисы

имеют значительные применения и играют воистину выдающуюся роль, т.к. при разложении вектора по такому базису его ошибка трансформируется в конечную ошибку с минимально возможным коэффициентом 1, т.е. число обусловленности $\mu = 1$. Такое свойство ортогональных базисов исключительно важно в численных расчетах. Другим важным положительным свойством является возможность определения коэффициентов разложения b_j (коэффициентов математической модели) независимо друг от друга. Такие коэффициенты будут статистически независимы (ортогональны) друг относительно друга.

Получение ортогонального базиса возможно при системном конструировании многофакторного эксперимента и использовании системы ортогональных полиномов. Такое системное конструирование эксперимента называется планированием эксперимента.

3.6 Проблема плохо обусловленных систем и, как следствие ее, некорректно поставленных задач

Решение прикладных задач весьма часто связано с плохо обусловленными системами и, как следствие, с некорректно поставленными задачами. При рассмотрении статистического класса таких задач можно говорить о решениях в теории идентификации, обратных задачах, в частности, о многофакторном математическом моделировании, оптимальном управлении.

Упрощения при определении структуры многофакторных математических моделей приводят к потере "малых" составляющих и сглаживанию отдельных "деталей" определяемой зависимости. Введение значительного числа структурных составляющих приводит к увеличению дисперсии коэффициентов регрессии, что ухудшает качество решения. Теоретическая математика постулирует структуру определяемых моделей и для предложенной структуры конструирует оптимальный план эксперимента. В прикладных задачах сложных технологических систем структура многофакторной модели неизвестна. В этом заключается одно из принципиальных различий в формулировке исходных положений при решении задач с позиций теоретического и прикладного подходов.

Плохо обусловленная система линейных уравнений представляется системой почти параллельных векторов структурных элементов (составляющих) системы базисных функций. При небольшом изменении наклона или сдвиге каждого вектора, что связано с исходными ошибками его задания, сильно изменяются координаты (решения) точки пересечения этих векторов (рис. 3.2).

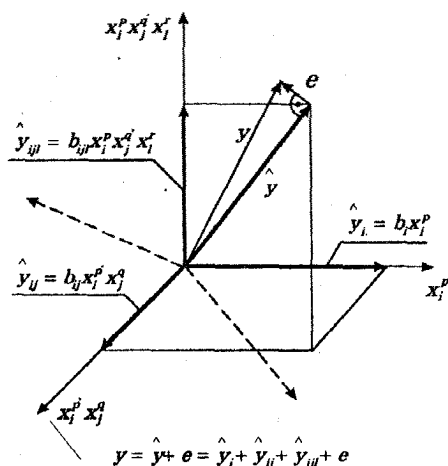


Рис. 3.1. Разложение вектора результатов технологических экспериментов в выбранном базисе

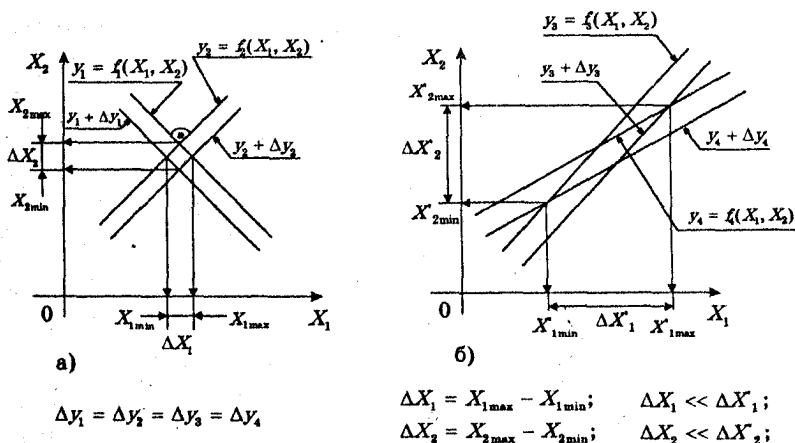


Рис 3.2. Изменение результатов решения при а) ортогональных и б) близких к параллельным векторах

На рис. 3.2 а показано изменение результатов решения (координат) $\Delta x_1, \Delta x_2$ при ортогональных векторах u_1, u_2 , а на рис. 3.2 б — векторов u_3, u_4 , близких к параллельным. Значения ошибок решения (конечных) во втором случае значительно больше, чем в первом ($\Delta x_1 \ll \Delta x'_1, \Delta x_2 \ll \Delta x'_2$) при одинаковых исходных погрешностях в первом и втором случаях ($\Delta y_1 = \Delta y_2 = \Delta y_3 = \Delta y_4$).

Степень обусловленности системы обычно выражают числом обусловленности

$$\mu = \|(X^T X)\| \times \|(X^T X)^{-1}\|.$$

Относительная погрешность фактора δx связана с относительной погрешностью отклика δy (при проведении вычислений и решении системы линейных уравнений) неравенством

$$\|\delta x\| \times \mu \geq \|\delta y\|.$$

Учитывая, что решается регрессионная задача, минимальное значение относительной погрешности x можно принять $\delta x \approx 0,001$, а максимальное для $y - \delta y \approx 0,1$. Тогда $\mu \leq 100$. Если же число обусловленности $\mu > 100$, то итоговые погрешности y будут настолько большие, что полученное решение не имеет практической ценности.

Однако более приемлемые значения $\delta x \approx 0,005$ (т.е. 0,5 %) и $\delta y \approx 0,05$ (т.е. 5 %) дают $\mu \leq 10$. Из приведенных оценок следует, что для получения хорошего качества математических моделей множественной регрессии необходимо конструировать эксперимент, метод обработки результатов и стремиться получить ортогональную или достаточно близкую к ней систему эффектов. Напомним, что при любой норме матрицы $\mu \geq 1$, и наилучшее значение $\mu = 1$, если векторы ортогональны и нормированы.

Выбор правильной структуры многофакторного уравнения регрессии еще более усложняется в случае решения некорректно поставленных задач. "Взаимосвязанность этих двух задач — статистической обработки и интерпретации — является одной из сложнейших и мучительных задач проблемы автоматизации обработки, интерпретации и моделирования данных эксперимента" [211, с. 52]. Отметим это весьма редкое признание уровня сложности рассматриваемых в настоящей работе проблем, полученное из среды профессиональных математиков (факультет вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова).

Плохая обусловленность при решении задачи требует не повышения точности вычислений (двойная или даже тройная точность), а изменения фактических причин, которые порождают эту плохую обусловленность.

При решении некорректно поставленных задач невозможно добиться однозначного решения. Однако при конструировании технологического эксперимента всегда можно сузить возможный разброс структурных составляющих множественного уравнения регрессии и попытаться получить струк-

туру, наиболее близкую к истинной. Вероятность достижения такой структуры будет приближаться к единице, если матрица дисперсий-ковариаций будет приближаться к $(1/M)E\sigma^2(\delta)$. Степень такой близости может косвенно характеризовать число обусловленности μ . Если $\mu = 1$, то матрица дисперсий-ковариаций будет соответствовать $(1/M)E\sigma^2(\delta)$. Сравнительно малые значения ковариаций будут несколько увеличивать значение μ . Практика решения многих задач показала, что при использовании предлагаемой методологии конструирования технологического эксперимента и программного средства "Планирование, регрессия и анализ моделей" были получены значения $\mu \leq 10$.

Типичной становится ситуация, когда необходимо в автоматизированном режиме проводить обработку результатов экспериментов с помощью ЭВМ, получить математические модели экспериментальных комплексов, проводить моделирование с использованием автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) и реализовывать с моделями вычислительный эксперимент. В программе развития работ по математическому моделированию до 2000 г., руководимой акад. А.А. Самарским [212, с. 16], разработка методов и вычислительных алгоритмов решения нелинейных некорректно поставленных задач признана важным направлением развития вычислительной математики.

Разработанные методы применяются в решении комплексных задач математического моделирования в институтах и на предприятиях Украины [213, с. 9].

3.7. Два подхода в решении проблемы некорректно поставленных задач

Решая прикладные системные задачи математического моделирования, специалисты в различных предметных областях обычно вынуждены работать с некорректно поставленными задачами. Известны различные подходы в их решении.

1. Оптимальное конструирование многофакторного технологического эксперимента и методологии обработки результатов [214, с. 53–57; 215, с. 56–59; 216, с. 134–146].
2. Регуляризация плохо обусловленных решений по А.Н. Тихонову.

Возможен также отказ от математического моделирования как метода решения задачи и использование другого системного подхода для достижения поставленной цели.

При использовании методологии теории планирования эксперимента предполагается, что факторы и число их уровней заданы, модель линейна относительно независимых параметров, структура ее известна и модель адекватна результатам эксперимента. Продолжая концепцию совместно эффективных оценок Р. Фишера, можно сформулировать ряд требований к

матрице дисперсий-ковариаций $(X^T X)^{-1} \sigma^2(\varepsilon)$, при которых коэффициенты математической модели b_i и значения критерия качества \hat{y} , вычисленные по полученной модели, будут наиболее устойчивы.

План эксперимента X_* соответствует критерию D -оптимальности, если ему соответствует минимум определителя матрицы дисперсий-ковариаций $(X^T X)^{-1}$ или (что то же самое) максимальный определитель информационной матрицы $X^T X$

$$|(X^T X_*)^{-1}| = \min_x |(X^T X)^{-1}| = \max_x |X^T X|.$$

Геометрическая интерпретация критерия D -оптимальности соответствует минимуму объема эллипсоида рассеяния оценок параметров (коэффициентов) модели.

Эллипсоид рассеяния — k -мерный эллипсоид с центром в точке $B = (X^T X)^{-1} X^T Y$ и имеющий такие размеры, что ковариационная матрица случайного вектора, равномерно распределенного на нем, совпадает с матрицей $(X^T X)^{-1} \sigma^2(\varepsilon)$. Доверительный эллипсоид с вероятностью $1-\alpha$ накрывает точку β математического ожидания коэффициентов регрессии. При выполнении этого критерия достигается минимум обобщенной дисперсии оценок коэффициентов уравнения регрессии и они наименее чувствительны к случайным изменениям результатов опытов y_{it} .

Известны также критерии оптимальности планов для предсказательных свойств модели.

План эксперимента X_* , соответствующий критерию Q -оптимальности, минимизирует среднюю дисперсию предсказания функции отклика (критерия качества) \hat{y} по всей области факторного пространства. Для дискретной области x из N точек (принадлежащих плану эксперимента)

$$\sum_x \sigma^2(\varepsilon) [\hat{y}(x, X_*)] / N = \min_x \sum_x \sigma^2(\varepsilon) [\hat{y}(x, X_*)] / N,$$

где N — число опытов в плане эксперимента по области планирования x ; $\sigma^2(\varepsilon)$ — теоретическое значение дисперсии воспроизводимости результатов экспериментов.

В прикладных целях целесообразно рассмотреть возможность одновременного выполнения сочетания критериев D - и Q -оптимальности. Для этого необходимо, чтобы план эксперимента был регулярным [regularis (лат.) — правильный] и равномерным.

Факторный план X_* , т.е. план с определенным типом модели, называется регулярным планом мощности t , если выполняется условие пропорциональности частот для любых t факторов [217, с. 37, 65].

Если факторный план соответствует критерию регулярности и равномерен [217, с. 22], то он D -оптимальный, а при выполнении некоторых дополнительных условий A - и Q -оптимальный [217, с. 68-77].

Из приведенного можно заключить, что при возможности планирования эксперимента с управляемыми факторами и правильным выбором плана эксперимента можно гарантировать получение устойчивых коэффициентов математических моделей по результатам технологических экспериментов и, таким образом, исключить возможность возникновения некорректно поставленных задач.

Типичность плохой обусловленности прикладных задач самых разнообразных классов стимулировала поиск математиками и специалистами в прикладных областях исследований общих методов их решения. Получил определенное распространение метод регуляризации некорректно поставленных задач в различных модификациях. Значительные работы были проведены школами акад. А.Н. Тихонова, акад. М.М. Лаврентьева и их учениками и последователями [218; 219, с. 161–171; 211, с. 47–72]. В 1962 г. использовал регуляризацию в решении регрессионных задач А. Хёрл (А.Е. Hoerl) [220, с. 54–59] и обобщил в работе [221, с. 55–67]. Метод получил название гребневой регрессии (ridge regression).

Рассмотрим основное положение регуляризации применительно к классу задач линейного регрессионного анализа.

Коэффициенты уравнения регрессии b_i в матричной форме при использовании метода наименьших квадратов имеют вид

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y,$$

где B , X , Y — соответственно матрицы коэффициентов, эффектов факторов и результатов многофакторного уравнения регрессии.

При плохой обусловленности матрицы дисперсий-ковариаций оценки коэффициентов не устойчивы и имеют большие абсолютные величины. Идея регуляризации заключается в увеличении матрицы $X^T X$ на неотрицательно определенную матрицу rE , что делает ее более определенной и, как следствие, оценки коэффициентов становятся более устойчивыми. Новые оценки коэффициентов

$$B_r = (X^T X + rE)^{-1} X^T Y,$$

где r — параметр регуляризации; $r > 0$.

Указанное действие приводит к определенным систематическим ошибкам, т.е. к смещению коэффициентов b_i , и уменьшает их квадратичные ошибки оценок. В работе [221] доказано, что всегда можно выбрать такое значение r , при котором существенно уменьшаются квадратичные ошибки оценок, т.е. решение потенциально существует.

Исследования с целью выявления эффективности регуляризации при получении моделей с использованием метода наименьших квадратов показали их хорошую эффективность по сравнению с обычным применением метода наименьших квадратов. Однако при практическом использовании регуляризации (иначе ридж-оценивания) конкретный выбор значения параметра регуляризации r затруднен: аналитическое исследование свойств ридж-оценок труднодоступно, так как методология выбора параметра r явля-

ется стохастической. Анализ фактического использования регуляризации в прикладных исследованиях с применением линейного регрессионного анализа показывает, что она используется крайне редко.

Сравнивая достигнутые возможности рассмотренных двух подходов в решении проблемы некорректно поставленных задач в прикладных технологических исследованиях, можно заключить следующее.

1. Оптимальное конструирование многофакторного технологического эксперимента и методологии обработки результатов позволяет не допустить возникновения некорректно поставленных задач, получить устойчивые многофакторные математические модели с семантической структурой, равной (в случае полного факторного эксперимента) или близкой (в случае дробного факторного эксперимента) к "истинной". Практика математического моделирования подтверждает такой вывод.
2. Регуляризация плохо обусловленных решений (ридж-оценивание) при использовании метода наименьших квадратов, улучшая устойчивость коэффициентов математической модели, вносит систематическую погрешность в значения коэффициентов. Выбор структуры, близкой к "истинной", в условиях мультиколлинеарности факторов и взаимодействий факторов маловероятен. Устойчивость коэффициентов достигается искусственным ("силовым") приемом.

Из приведенного следует, что оптимальное конструирование технологического эксперимента предпочтительнее регуляризации. Однако необходимо продолжить разработку его методологии для реального прикладного применения, когда структура математической модели исследователю неизвестна.

3.8 Принцип структурной минимизации при синтезе математических моделей с использованием формализованного подхода

При поиске структуры математической модели с использованием метода наименьших квадратов и экспериментальных данных чрезмерное расширение класса функций, в котором ищется решение, приводит к подлинной катастрофе — "развалу решения" [222, с. 741].

Еще средневековый философ Уильям Оккам сформулировал принципы минимизации используемых понятий и средств в деятельности человека. "Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem" — сущности не должны быть умножаемы сверх необходимости. "Frustra fit plura quod fieri potest pauciora" — бесполезно делать посредством многого то, что может быть сделано посредством меньшего. Практика научного объяснения реальной действительности показывает необходимость использования этого принципа.

При выборе структуры математической модели следует руководствоваться принципом выбора наиболее простого объяснения наблюдаемых фак-

тов. Этого же принципа придерживался и И. Ньютон. Необходимость его использования связана с формализацией понятий "простой" и "сложной" структуры и "истинности" объяснения наблюдаемых явлений.

Принципа структурной минимизации необходимо придерживаться при синтезе математических моделей. Проф. Дж. Райс (прикладная и вычислительная математика) считает, что основная проблема множественного регрессионного анализа "состоит в том, что распространенные выборы моделей приводят к плохо обусловленным матрицам $A^T A$, настолько плохим, что решения систем представляют собой случайные числа, не имеющие отношения к исходной задаче" [223, с. 165].

Структура математической модели должна формироваться по принципу выбора эффектов от более простых — главных эффектов, взаимодействий по два элемента в каждом — и далее к взаимодействиям более высокого порядка. Вводимые в структуру модели эффекты должны быть ортогональны друг другу или слабо закоррелированы между собой и как можно более закоррелированы с моделируемым критерием качества, т.е. откликом. Теоретическое рассмотрение и практика решения многочисленных задач подтверждают гипотезу о том, что взаимодействия с большим числом элементов менее вероятны как статистически значимые по сравнению с взаимодействиями, имеющими меньшее число элементов (два, три).

Помимо формальных рекомендаций в наиболее сложных решениях задач необходимо привлекать профессиональные знания о моделируемом процессе, опыт предшествующих исследований, интуицию и эвристические рекомендации исследователя.

3.9 Основные выводы

Использование формализованного (математического) описания необходимо, так как только в этом случае реальные системы могут достичь совершенства в системном (многокритериальном) смысле. Поиск совершенства системы — процесс. Этот процесс неизбежно включает и формализованные (абстрактные) "блоки", и практику, которая выступает в виде экспериментальных действий с технологическими системами.

Из приведенного следует, что вопросы формализации не являются полной системой действий для исследователя технологических систем. Определяющей здесь является правильность исходных предположений, которая вытекает из содержательного понимания исследователем технологической системы. Применение полученных математических результатов должно решаться не только с позиций математики, но и поставленных технологических целей исследования.

Рассматриваемая проблема формализованного описания технологических и технических систем объективно сложна. Ее успешное решение требует участия инженеров и математиков. Акад. А.А. Самарский обращает вни-

мание на то, что возникает много новых фундаментальных математических проблем большой сложности и трудности; большинство задач нелинейны и их модели содержат много неожиданностей и новых эффектов [59, с. 5]. Многолетняя практика решения таких задач показывает, что необходимо сформировать творческий коллектив из специалистов различной профессиональной ориентации, имеющих практический опыт решения прикладных задач.

Сложность и трудность математических проблем — лишь одна сторона решаемых задач. Другая сторона — формализация реальной действительности, поиск или конструирование (изобретение) новых методов, приемов формализации реальных систем. На этом пути возникают не менее сложные проблемы. К такому выводу много лет назад, на заре создания ЭВМ пришел Джон фон Нейман. "Если люди не верят в то, что математика проста, то это только потому, что они не осознают, насколько сложна жизнь".

Математическое описание технологических систем на основе системного и экспериментально-статистического подходов не сводится только к технической и математической сторонам формализованного описания действительности. В этом процессе проявляются наиболее типичные и фундаментальные формы бытия и методологии познания, а в статистическом подходе — так называемая необходимая системность — признак непосредственной реальности и комплексности ее рассмотрения, а также соответствие характеристик системы фактическим свойствам, а не принятым исходным условиям; получение полезной информации непосредственно по проявлениям реальной действительности (технологический эксперимент); однотипность основы получения (статистичность) и измерения количества информации и ее эффективности.

Уменьшение доли участия человека в производственном процессе, повышение качества выпускаемой продукции, автоматизированное управление технологическими процессами, научное изучение технологических и технических систем — все эти проблемы могут быть успешно решены только на основе применения и разработок экспериментально-статистических методов, которые и образуют на практике вероятностный стиль мышления.

Сформулируем краткие выводы по главе 3.

1. Формализованное описание технологических и технических систем в виде математического моделирования — необходимый и обязательный компоненты их научного развития. Математическое моделирование, будучи универсальным средством разработки новых и совершенствования известных технологических систем, становится не менее важным, чем сами технологические системы, так как может привести к принципиально новым прикладным результатам в машиностроении.

Прикладное математическое моделирование существенно ускоряет темпы научно-технического прогресса: старая методология не позволяет эффективно решать многофакторные и многокритериальные задачи технос-

логи, которые оказываются сложнее задач ядерной физики, физики плазмы, космонавтики.

2. Формализованное описание технологических систем осуществляется на основе аппроксимирующих математических моделей. Упрощенные формы описания необходимы, поскольку большинство задач в технике и технологии нельзя решить в необходимые сроки с доступными затратами ресурсов. Разработка формализованных методов аппроксимации является основным направлением развития точных методов в технологических научных исследованиях.
3. Формализованный выбор структуры математических моделей на основе экспериментально-статистического подхода — одна из основных задач моделирования. Необходимо обеспечить автоматизированный выбор структуры модели, притом с такими структурными составляющими, которые представляют семантическую (смысловую) информацию о системных связях факторов и критериев качества. Практика получения таких моделей на основе содержательного анализа и вскрытия механизмов происходящих явлений в технологических системах обычно свидетельствует о недостаточности их качества и системных свойств. С ростом новизны и сложности технологических систем построение аналитическим путем удовлетворительных моделей не удается [18, с. 133].
4. Формальное использование классических методов теоретической математики в решении прикладных задач, связанных с экспериментальными данными, в общем случае не дает положительных результатов. Глубокие причины заключаются в том, что теоретическая математика в своем понятийном аппарате и правилах вывода не содержит каких-либо неопределенностей. Технологические системы в достаточной степени неопределены ("размыты") как в свойствах своего начального состояния, так и в траекториях функциональных проявлений. Акад. А.Н. Тихонов показал принципиальность этого положения [208, с. 94].
5. Несмотря на значительное распространение множественного регрессионного анализа в различных исследованиях, его практическое использование и интерпретация полученных моделей связаны со многими трудностями. Основной проблемой является устойчивость при выборе структуры и вычислениях коэффициентов математических моделей. Решение таких задач относится к классу плохо обусловленных систем, а сами задачи — к некорректно поставленным. При плохой обусловленности решаемой задачи действия, направленные на ее решение, не могут привести к правильным результатам без изменения плохой обусловленности.
6. Из трех возможных подходов в случае необходимости решения плохо обусловленных систем и, как следствие, некорректно поставленных задач — оптимальное конструирование многофакторного технологического эксперимента и методологии обработки результатов, регуляризация плохо

обусловленных решений по А.Н. Тихонову, отказ от математического моделирования как метода решения задачи и использование другого системного подхода для достижения поставленной цели — наилучшим является первый, так как он исключает плохую обусловленность и дает решение, наиболее близкое к реальному, а не регуляризованному. В общем случае технологические системы позволяют оптимальное конструирование системного многофакторного эксперимента. Однако структура модели в традиционных решениях считается заданной, т.е. известной до выбора плана эксперимента. В такой постановке задачи предложенная структура модели может быть неадекватна результатам эксперимента.

7. Необходимо разработать методологию оптимального (или квазиоптимального) конструирования эксперимента, который был бы устойчивым (робастным) к выбору структуры математической модели и получению коэффициентов этой математической модели. Такая постановка задачи является принципиально новой. Анализ статистической литературы и многолетний опыт прикладного решения реальных задач показывают, что математические модели целесообразно получать в классе моделей линейных относительно независимых параметров.

Глава 4 Последовательная многофакторная схема получения "наилучшего" уравнения регрессии и проведения экспериментального исследования

Реализация многофакторного математического моделирования технологических систем требует затрат в пространстве и во времени с участием исполнителей, материалов, энергоносителей, привлечения необходимого исследовательского оборудования, которые должны взаимодействовать между собой по определенному плану (технологии). С увеличением сложности проводимых технологических исследований, что выражается в их системности — числе факторов и откликов, вводимых в рассмотрение, — затраты на проведение эксперимента возрастают.

В отличие от "чистой" математики, где используется абстракция потенциальной осуществимости возможности построения произвольного объекта, состоящая в отвлечении от возможных пространственных, временных и материальных препятствий к его построению, в проведении прикладных исследований пренебрегать затратами указанных ресурсов невозможно. Тем самым к уже рассмотренным критериям получения многофакторных математических моделей добавляется критерий, ограничивающий затраты различных материальных ресурсов.

Число необходимых опытов в плане эксперимента для получения многофакторной математической модели будет зависеть от числа факторов, сложности поведения каждого фактора и сложности поведения моделируемой системы. Сложность поведения фактора в математическом моделировании формализованно описывается степенью полинома, необходимого для адекватной аппроксимации результатов опытов. Сложность моделируемой системы определяется сложностью ее системного описания, под которым будем понимать число статистически значимых взаимодействий факторов или число введенных взаимодействий факторов.

Верхние границы для значений степеней полиномов, которые описывают влияние факторов, и системная сложность моделируемой системы обычно исследователю неизвестны. Поэтому при выборе числа опытов в эксперименте может быть как недобор, что приведет к неадекватной модели, так и перебор числа опытов. В последнем случае использование ресурсов будет малоэффективным.

Выбор числа опытов может быть одноразовым или последовательным. В первом подходе число опытов назначается до начала проведения эксперимента и далее не изменяется. Во втором подходе число опытов в случае необходимости можно последовательно увеличивать. Идея последовательного изменения числа необходимых элементов выборки применительно к проверке статистических гипотез была впервые предложена А. Вальдом в 1943 г. и более широко описана как последовательный анализ [224]. Средний выигрыш в числе наблюдений с использованием последовательного кри-

терия по сравнению с обычным наиболее мощным критерием при проверке гипотезы о среднем значении нормального распределения случайной величины составляет не менее 47 % необходимого числа наблюдений [224, с. 85].

Использование последовательной схемы проведения эксперимента предполагает, что к ранее проведенным опытам прибавляют новые и рассматривают совместно, а в случае необходимости — следующие новые опыты и снова рассматривают совместно. Пример такого подхода можно проиллюстрировать в виде ряда последовательных экспериментов: $2^{3-1} // (4+1) \rightarrow 2^3 // (8+1) \rightarrow 3^3 // 15 \rightarrow 3^3 // 27$. Последовательность экспериментов такова: дробный факторный эксперимент 2^{k-p} (полуреплика) и нулевая точка; полный факторный эксперимент 2^k и нулевая точка; план Бокса на кубе (модель второго порядка); полный факторный эксперимент трех факторов на трех уровнях каждого из них.

В приведенном примере каждый из планов характеризуется для своей модели наилучшими статистическими свойствами. Проблема получения наилучшей последовательности планов экспериментов для произвольного набора факторов и их уровней в общем случае не имеет формализованного решения.

4.1 Схемы полного и дробного факторного эксперимента. Взаимодействие факторов и формализованное описание системных свойств

В п. 3.2.2 было рассмотрено получение структурной группы коэффициентов (3.1) полного факторного эксперимента. Полный факторный эксперимент характеризуется следующим замечательным свойством: для полного факторного эксперимента любой эффект взаимодействия одной группы факторов ортогонален любому эффекту взаимодействия другой группы факторов и число столбцов расширенной матрицы F равно $s_1 \times \dots \times s_k = N_{\eta}$ [217, с. 26–29].

Расширенная матрица F содержит столбец фиктивного фактора $x_0 = 1$, столбцы всех главных эффектов и всех возможных взаимодействий главных эффектов. Если эффекты факторов и взаимодействий факторов выразить в виде системы ортогональных нормированных контрастов, т.е.

$$\begin{aligned} \sum_{u=1}^N x_{iu}^{(p)} &= 0, & \sum_{u=1}^N x_{iu}^{(p)} \times x_{ju}^{(p)} &= 0, \\ \sum_{u=1}^N [x_{iu}^{(p)}]^2 &= N, & \sum_{u=1}^N [x_{iu}^{(p)} \times x_{ju}^{(p)}]^2 &= N, \end{aligned}$$

то матрица дисперсий-ковариаций примет вид

$$(X^T X)^{-1} \sigma_y^2 = (1/M) E \sigma_y^2,$$

где $x_{iu}^{(p)}$ — значение p -го ортогонального контраста i -го фактора для u -й строки матрицы планирования, $1 \leq u \leq N$, $1 \leq p \leq s_j - 1$;

$x_{ju}^{(p')}$ — значение p' -го ортогонального контраста j -го фактора для u -й строки матрицы планирования, $1 \leq p' \leq s_j - 1$, $1 \leq i < j \leq k$;

X — матрица эффектов полного факторного эксперимента;

σ_y^2 — теоретическое значение дисперсии воспроизводимости результатов опытов;

N — число опытов в плане эксперимента;

E — единичная матрица.

Математическая модель, полученная по схеме полного факторного эксперимента, соответствует многим замечательным свойствам: коэффициенты модели ортогональны друг другу и в статистическом смысле независимы; максимально устойчивы ($cond = 1$); каждый коэффициент несет семантическую информацию о влиянии соответствующего эффекта на моделируемый критерий качества; план эксперимента соответствует критериям D -, A -, E -, G -оптимальности; математическая модель адекватна в точках аппроксимации поверхности отклика. Будем считать такую модель истинной и "наилучшей".

Все эффекты математической модели поделим на две группы: главные эффекты и эффекты взаимодействия факторов. Первая группа эффектов показывает влияние факторов на моделируемый критерий качества независимо друг от друга, аддитивно, где существенное значение имеет сложение эффектов, вторая группа — совместное влияние факторов, мультипликативно, где существенное значение, кроме сложения эффектов, играет их перемножение.

Для двух факторов X_1 , X_2 и плана эксперимента $3^2/9$ эти группы эффектов будут такими:

$$\hat{y} = (b_0 + b_1x_1 + b_2z_1 + b_3x_2 + b_4z_2) + (b_5x_1x_2 + b_6x_1z_2 + b_7z_1x_2 + b_8z_1z_2).$$

Влияние взаимодействий факторов зависит от значений факторов, входящих в эти взаимодействия. Так как взаимодействия факторов могут содержать два, три и более (до k) эффектов факторов, то группа эффектов взаимодействия факторов должна интерпретироваться как системное влияние факторов. Последнее создает одно из важнейших системных свойств — эмергентность.

Взаимодействия факторов играют важную роль в вопросах методологии формирования математических моделей и интерпретации механизмов происходящих явлений технологической системы. Количественное изучение износа режущего инструмента показало, что отношение радиального износа к ширине фаски износа при различных сочетаниях t , s , v и строгом сохранении постоянства геометрии резца не остается постоянной величиной [225, с. 167]. Исследования, проведенные д.т.н. А.Д. Макаровым, показали, что погрешности в определении радиального износа могут достигать 100—

200 %. "Поэтому радиальный износ расточных резцов, так же как и радиальный износ проходных резцов для наружного точения, должен определяться непосредственным измерением" [225, с. 167], т.е. экспериментальным путем. Добавим, что по замеренным экспериментальным данным целесообразно получить в целях прогноза и управления математическую модель $f_{\text{рад из}} = f(t, s, v, t_p)$ (t_p — время обработки) по плану эксперимента $3^4/127$. Указанный план эксперимента позволяет получить адекватную математическую модель и проанализировать возможные взаимодействия факторов.

На необходимость учета взаимовлияния факторов в исследованиях точности обработки резб метчиками обращал внимание д.т.н. В.В. Матвеев [226].

В комплексной фундаментальной работе, посвященной рассмотрению состояния науки о резании металлов в СССР, написанной большим авторским коллективом ведущих ученых Союза [46], подчеркивалась необходимость учета влияния всех факторов, имеющих практическое значение в конкретной обработке резанием. Отмечается, что правильный учет взаимодействия факторов играет важную роль для оценки суммарного действия всех факторов [46, с. 392].

Схема полного факторного эксперимента и получение по ее результатам линейной относительно факторов математической модели гарантирует комплексное исследование влияния многих условий, а группа взаимодействий факторов формализованно описывает именно системный характер влияния факторов.

Принципиальную важность формализованного выражения в математических моделях системных свойств показывают исследования американской корпорации "Боус". Имея самый большой научно-исследовательский отдел в мире в области акустических исследований и проводя в этой области фундаментальные исследования, она установила, что эффект восприятия звука слушателями лишь на 10 % определяется непосредственно от источника, остальной доходит до них в отраженном виде, т.е. после взаимодействия с системой (стены, интерьер, пол, потолок и другие предметы), в которой происходит восприятие звучания [123, с. 16]. Здесь системное влияние комплекса условий составляет 90 %.

Схема полного факторного эксперимента содержит в общем случае значительное число опытов ($N = N_{\Pi}$) и в прикладных технологических исследованиях не всегда может быть использована. Необходимо применять дробный факторный эксперимент, т.е. $N < N_{\Pi}$.

Будем считать, что структура математической модели неизвестна исследователю и для получения модели используется дробный факторный эксперимент. Определение истинной структуры модели в этом случае затруднительно: размерность пространства результатов эксперимента $N < N_{\Pi}$, и с увеличением числа факторов $N \ll N_{\Pi}$. Главные эффекты и эффекты взаимодействий факторов неизбежно закоррелированы между собой, что

создает неопределенность истинности их вычисленных значений и неопределенность формирования истинной структуры математической модели. Для дробного факторного эксперимента необходимо разработать методологию выбора плана эксперимента и формирования структуры модели.

4.2 Необходимые и достаточные условия получения "наилучшего" уравнения регрессии

Рассмотрим два требования к коэффициентам математических моделей.

1. Ортогональность эффектов, входящих в математическую модель, друг другу.
2. Статистическая значимость коэффициентов модели или максимальная значимость введенных коэффициентов в модель по сравнению со значимостью не введенных в модель коэффициентов.

По теореме Хотеллинга [227, с. 45] выполнение первого требования приводит к минимизации соответствующих дисперсий коэффициентов математической модели: $D' b_i) = \min, 1 \leq i' \leq k'$.

Выбор и ввод в математическую модель статистически значимых коэффициентов минимизирует общее число коэффициентов математической модели и, таким образом, выполняется принцип структурной минимизации при формировании математических моделей.

Первое требование следует классифицировать как необходимое, а второе — как достаточное для введения эффектов в структуру математической модели.

Поскольку обеспечить ортогональность всех эффектов введенных в модель в дробном факторном эксперименте в общем случае затруднительно или невозможно, будем стремиться к обеспечению методами планирования эксперимента ортогональности всех главных эффектов между собой и к слабой закоррелированности эффектов взаимодействий факторов и главных эффектов

$$|r(x_{ii}^{(p)}, (x_{ii}^{(p)} \times x_{ju}^{(q)}))| \leq 0,3-0,4.$$

В разделе 4.5 будет показано, что эти условия для планируемого дробного факторного эксперимента практически выполнимы.

Сформулированные необходимые и достаточные условия являются основными для получения "наилучшего" уравнения регрессии, но не полными. Необходимо также, чтобы план эксперимента был равномерен [217, с. 22] и каждый из эффектов был нормирован, т.е.

$$\sum_{u=1}^N [x_{ii}^{(p)}]^2 = \sum_{u=1}^N [x_{ii}^{(p)} \times x_{ju}^{(q)}]^2 = N.$$

Получение равномерного плана определяется выбором числа уровней факторов и числа опытов в плане эксперимента. В большинстве случаев выбор плана эксперимента, соответствующего критерию равномерности, возможен. Если (в случае с качественными факторами или дискретными уровнями количественных факторов) выбор плана, соответствующего критерию равномерности, не представляется возможным, то функция эффективности, связанная с критерием средней дисперсии [217, с. 170–171], в большинстве случаев составляет не менее 81–89 %. Можно рекомендовать разбить план эксперимента на ортогональные блоки и, в конечном счете, уменьшить дисперсии коэффициентов математической модели. Что касается нормирования эффектов, то его проведение всегда возможно и желательно для повышения устойчивости коэффициентов.

При рассмотрении понятия базиса в линейном пространстве любые линейно независимые векторы в этом пространстве могут быть выбраны в качестве базиса. При теоретическом рассмотрении линейного пространства "нет оснований предпочитать одни базисы другим – там все базисы равноправны" [210, с. 38]. Между различными N -мерными пространствами можно установить изоморфное соответствие: базис одного пространства может перейти в базис другого пространства.

В решениях прикладных задач разложения вектора исходных данных результатов эксперимента, заданного с погрешностями, по выбранному базису, ортогональный базис наиболее устойчив к трансформированию (преобразованию) погрешностей исходных данных в конечные погрешности коэффициентов математической модели.

Другим важным при выборе ортогонального базиса и в прикладном отношении необходимым следствием является статистическая независимость полученных коэффициентов математической модели, т.е. коэффициент парной корреляции для коэффициентов $r(b_i, b_j) = 0$. Статистическая независимость коэффициентов друг относительно друга облегчает семантическую (смысловую) интерпретацию полученной модели: знак коэффициента показывает направление, а величина – силу влияния рассматриваемого эффекта на моделируемый критерий качества.

Приведенное описание статистической независимости коэффициентов модели необходимо для схемы любого полного факторного эксперимента. Для схемы дробного факторного эксперимента при выборе регулярных факторных планов все главные эффекты будут ортогональны друг другу. Требование ортогональности введенных в модель эффектов взаимодействия для дробного факторного эксперимента вынуждено должно быть ослаблено:

$$|r(x_{iu}^{(p)}, (x_{iu}^{(p)} \times x_{ju}^{(q)}))| \leq 0,3-0,4.$$

4.3 Постулирование структуры математической модели и проблема ее адекватности

Ставшая уже классической традиционная методология теории планирования эксперимента предлагает в системе "модель — план эксперимента" первоначально задать вид модели, а затем, выбрав тот или иной критерий, предложить для принятой модели план эксперимента. Ввиду важности этого вопроса и принципиальности различия действий, если следовать этим рекомендациям или предложить другой подход, приведем примеры.

Рассматривая логические основания планирования эксперимента, д.т.н. В.В. Налимов, к.т.н. Т.И. Голикова подчеркивают, что матрица независимых переменных X появляется только после того, как модель задана [103, с. 31].

Д.т.н. П.В. Новицкий, к.т.н. И.А. Зограф обращают внимание на то, что планирование эксперимента возможно только после установления вида математической модели исследуемого явления [228, с. 277].

Специалист, решающий прикладную задачу, должен быть уверен, что предложенная структура математической модели будет адекватна полученным результатам эксперимента. При решении задач по новой технологической системе или достаточно сложной задачи в другой предметной области полученная модель может быть неадекватна. План эксперимента, будучи оптимальным для определенной модели, может оказаться "наихудшим из возможных", если модель в действительности окажется иной [229, с. 184].

При выборе или поиске структуры математической модели будем различать две сложившиеся концепции по функциональным требованиям к получаемым математическим моделям.

1. Аппроксимация полученных исходных данных произвольной структурой математической модели с целью получения адекватной модели и без требования выполнения семантической интерпретации полученной модели.
2. Получение адекватной математической модели, общий вид которой и коэффициенты могут давать исследователю семантическую информацию о механизмах происходящих явлений.

Первая концепция преследует цель лишь близости полученной поверхности отклика к гипотетической "истинной" поверхности: близость полученной, иначе модельной поверхности отклика в геометрическом смысле, к "истинной" поверхности.

Вторая концепция представляет значительный интерес и наиболее сложна в реализации.

По первой концепции обычно предлагается несколько типов функций, для которых необходимо найти коэффициенты в численном виде. В большинстве проанализированных публикаций предложенные функции не могут быть обоснованы с позиций семантической информации. Как правило, предлагаются однофакторные функции [230, с. 58—60]. Многофакторные функ-

ции (не более двух — четырех факторов) встречаются в виде, нелинейном по параметрам.

В классе многофакторных математических моделей обычно предлагаются модели второго порядка и весьма редко — третьего порядка. Практика использования моделей второго порядка показывает, что их структурная сложность недостаточна и, следовательно, полученная модель часто неадекватна.

Основное противоречие при постулировании структуры математической модели и попытке получения адекватной модели заключается в отсутствии необходимой полезной информации относительно структурной сложности искомой модели и выбора структуры модели, соответствующей этой сложности. С возрастанием сложности моделируемых систем и требования получения адекватной модели (особенно для высокоточных, прецизионных моделей) это противоречие путем постулирования структуры модели решить невозможно.

Решение этого противоречия следует искать в использовании принципа последовательного расширения структуры математической модели и последовательной схемы проведения экспериментального исследования. Для этого необходимо программно и алгоритмически реализовать процедуры, позволяющие осуществлять на вычислительных машинах слабо формализованные, но очень важные приемы и методы статистического анализа данных. К таким процедурам д.ф.-м.н. С.А. Айвазян относит "процедуры, помогающие осуществить выбор общего параметрического вида математической модели в задачах регрессии или классификации; различные подходы к получению устойчивых (в определенном смысле) статистических выводов" [231, с. 101].

4.4 Принцип последовательного расширения структуры математической модели и последовательная схема проведения экспериментального исследования

Попытки исследователей получить адекватные математические модели при описании сложных систем и использовать при этом минимально возможные ресурсы привели к идее последовательного расширения структуры математической модели и последовательной схеме проведения экспериментального исследования. Такой подход заключается в следующем.

Проведение эксперимента предполагается по частям. После проведения начальной (первой) части эксперимента вычисляют коэффициенты модели, проводят статистический анализ адекватности, информативности, устойчивости полученной модели. Если результаты анализа качества модели позволяют заключить, что ее можно считать полученной, то процесс закончен. В противном случае к имеющимся результатам добавляют новые результаты за счет проведения второй части эксперимента без изменения или с изменением числа уровней факторов. Проводят поиск новой структуры математиче-

ской модели и новый анализ полученной математической модели. При повторном вычислении математической модели привлекают новую информацию, полученную при предшествующем расчете и анализе качества модели.

После повторения нескольких шагов поиска окончательного вида модели и достижения приемлемого результата процедуру поиска прекращают. При поиске модели используют как формализованную информацию, полученную по результатам проверки предшествующей модели, так и неформализованную эвристическую информацию, предшествующий опыт работы и профессиональную интуицию исследователя. Практика показывает, что при решении прикладных задач многофакторного математического моделирования сложных систем у исследователя отсутствует полнота необходимой для принятия решения информации.

Структуру математической модели формируют с учетом принципа структурной минимизации структурных составляющих модели. Для введения более сложных структурных составляющих при условии их ортогональности или слабой закоррелированности к уже введенным структурным составляющим необходимо увеличить число опытов в эксперименте. Так как шаг, на котором будет закончено формирование модели, исследователю не известен, то каждый из последовательного ряда планов экспериментов должен соответствовать (насколько это представляется возможным) хорошим свойствам: ортогональности, устойчивости, эффективности и другим. Конкретные алгоритмы получения последовательности планов экспериментов приведены в разделах 4.5–4.7.

Рассмотрим возможности последовательной схемы проведения эксперимента на примере формирования последовательности планов экспериментов для числа факторов $k = 2; 3; 4$. В качестве первоначальных планов можно выбрать дробные факторные эксперименты 2^2 и $2^{k-1} +$ нулевая точка. На втором шаге нужно перейти к экспериментам $2^2; 2^3; 2^4 +$ нулевая точка, на третьем шаге — к квази- D -оптимальным планам второго порядка Бокса на кубе $B_2; B_3; B_4$, на четвертом шаге — к экспериментам $3^2//9; 3^3//27; 3^4//27$.

Планы $3^2//9, 3^3//27$ известны как полные факторные эксперименты и их легко составить. При использовании системы ортогональных контрастов любой эффект ортогонален любому другому эффекту модели. План $3^4//27$ представляет собой план $3^3//27$ (для первых трех факторов) и четвертый столбец, составленный следующим образом. Уровни 0, 1, 2 (для первых трех опытов) циклически переставляются по схеме: 0, 1, 2; 1, 2, 0; 2, 0, 1 (для первых девяти опытов). С десятого опыта уровни 1, 2, 0 также переставляются циклически. С девятнадцатого опыта осуществляется перестановка уровней 2, 0, 1.

Планы $3^2//9, 3^3//27$ характеризуются наилучшими свойствами. Расширенная матрица плана эксперимента $3^4//27$ была исследована численными методами для установления ортогональных и близких к ним эф-

фактов. Анализ парных коэффициентов корреляции эффектов показал следующее [21, ч. 20, с. 46–54, табл. 4].

1. Все главные эффекты, все парные взаимодействия первого фактора с любыми другими факторами и четыре четверные взаимодействия взаимно ортогональны. Всего взаимно ортогонально 25 эффектов.
2. Все оставшиеся парные взаимодействия факторов (второго с третьим и четвертым, третьего с четвертым) имеют коэффициенты парной корреляции $|r_{ij}| \leq 0,4330$.
3. Все тройные взаимодействия факторов имеют $|r_{ij}| > 0,4$.
4. Все четверные взаимодействия (кроме ортогональных) закоррелированы с главными эффектами с $|r_{ij}| = 0,3273$.

Таким образом, по плану эксперимента $3^4/27$ можно ввести в математическую модель последовательно каждый из 48 эффектов, имеющих коэффициент парной корреляции с любым другим эффектом $|r_{ij}| \leq 0,4330$. Можно считать, что мультиколлинеарность (взаимная закоррелированность) этих эффектов между собой сравнительно невысокая.

План $3^4/27$ был использован для многофакторного математического моделирования высоковольтной термонапряженной изоляции электроаппаратов [232, с. 40–45]. Всего по плану эксперимента было получено девять моделей. Прогноз устойчивости математических моделей полностью подтвердился. Для четырех многофакторных математических моделей число обусловленности $cond = 1$, для остальных — $cond = 3,59–8,28$.

Использование плана $3^4/27$ (симметричного, равномерного, регулярного) обеспечило устойчивость (робастность) выбора структуры многофакторной модели и квази- D -оптимальность всех полученных моделей. С полученными математическими моделями был проведен вычислительный эксперимент и оптимизирована электроизоляционная конструкция высоковольтного трансформаторно-выпрямительного модуля напряжением 100 кВ.

Технология собственно последовательной схемы проведения эксперимента не является полной, т.е. самой по себе достаточной для получения "наилучшей" модели. Она должна дополняться и сочетаться с алгоритмическим и программным обеспечением поиска "наилучшей" структуры модели.

Специалист по теоретической и математической физике д.ф.-м.н. Н.Н. Калиткин, рассматривая аппроксимацию функций с использованием метода наименьших квадратов без предположений конкретного вида аппроксимирующей функции, показывает, что хорошее сглаживание ошибок эксперимента будет при числе коэффициентов модели k' существенно меньшем, чем полное число узлов таблицы N (которое соответствует числу независимых экспериментов). При экономии числа опытов определение оптимального числа коэффициентов становится трудной задачей: необходимо очень удачно подобрать вид $f(x)$ и для проверки достоверности результатов привлечь аппарат статистики [189, с. 61].

Выбираемое и вводимое в математическую модель число коэффициентов зависит от сложности аппроксимируемой поверхности (иначе поверхности отклика), которая зависит от числа факторов; сложности поведения каждого фактора, определяемого степенью полинома, необходимого для адекватной аппроксимации влияния фактора; сложности системного влияния факторов, выражающейся в количестве взаимодействий факторов и наивысшей степени введенных взаимодействий.

Анализ значительного числа решений прикладных задач по сложным технологическим, техническим системам позволил сформулировать рекомендации для выбора необходимого числа опытов плана эксперимента, если исследователю известна (приближенно) информация о предполагаемой сложности влияния факторов на моделируемый критерий качества. Для каждого фактора выбирается число уровней его варьирования, которое должно быть на 1 больше максимальной степени полинома, необходимой для адекватного описания этим фактором поверхности отклика. Необходимое число экспериментов будет

$$N \approx (1,5-2) \sum_{i=1}^k (s_i - 1),$$

где s_i — число уровней для фактора X_i ; $1 \leq i \leq k$.

Коэффициент 1,5 выбирают для случая, когда число необходимых экспериментов значительно (порядка 50—64 и более). При меньшем необходимом числе экспериментов следует выбрать коэффициент 2.

Будем предполагать формирование структуры для дробного факторного эксперимента (раздел 4.1), в котором $N < N_{\Pi}$. Выбор "наилучшего" уравнения регрессии осуществляется с выполнением необходимых и достаточных условий (раздел 4.2) его получения.

В пространстве результатов эксперимента размерности N структурные составляющие в количестве N_{Π} частично закоррелированы между собой. Выбор подмножества структурных составляющих $N_{\Pi\text{ММ}}$ для получения модели в общем случае не может быть выполнен однозначно. Предложен следующий алгоритм выбора структурных составляющих модели (шаги 1—13).

Шаг 1. В качестве начального плана эксперимента выбирают многофакторный регулярный план и эффекты выражают системой ортогональных полиномов Чебышева. Все главные эффекты такого плана ортогональны друг другу.

Шаг 2. Определяют величину закоррелированности каждого из главных эффектов $x_i^{(p)}$ с результатами эксперимента \bar{y}_u .

Шаг 3. Выбирают критическое значение коэффициента парной корреляции главных эффектов и взаимодействий факторов с результатами эксперимента \bar{y}_u ($|r_{ij}| \geq 0,1-0,05$).

Шаг 4. Если главный эффект $x_j^{(p)}$ имеет коэффициент парной корреляции с \bar{y}_u более критического, то он вводится в структуру модели, если менее — то не вводится.

Шаг 5. Из множества взаимодействий по два главных эффекта в каждом выбирают подмножество ортогональных и слабо закоррелированных взаимодействий (для которых $|r_{ij}| \leq 0,3-0,4$) с выбранными для введения в модель главными эффектами.

Шаг 6. Определяют величину закоррелированности каждого из выбранных в шаге 5 взаимодействий с результатами эксперимента \bar{y}_u .

Шаг 7. Если взаимодействие (по два элемента) имеет коэффициент парной корреляции с \bar{y}_u более критического, то оно вводится в структуру модели, если менее — то не вводится.

Шаг 8. Для структуры модели с главными эффектами и взаимодействиями по два элемента рассчитывают коэффициенты математической модели. Полученную модель анализируют по совокупности критериев качества и принимают решение о получении модели или продолжении ее поиска.

Шаг 9. Если модель не получена, то из множества взаимодействий по три главных эффекта выбирают подмножество ортогональных и слабо закоррелированных взаимодействий ($|r_{ij}| \leq 0,3-0,4$) с выбранными главными эффектами и взаимодействиями по два для введения в структуру модели.

Шаг 10. Определяют величину закоррелированности каждого из выбранных в шаге 9 взаимодействий с результатами эксперимента \bar{y}_u .

Шаг 11. Если взаимодействие (по три элемента) имеет коэффициент парной корреляции с \bar{y}_u более критического, то оно вводится в структуру модели, если менее — не вводится.

Шаг 12. Для структуры модели с главными эффектами и взаимодействиями по два и три элемента рассчитывают коэффициенты математической модели. Полученную модель анализируют по совокупности критериев качества и принимают решение о получении модели или продолжении ее поиска.

Шаг 13. Если модель не получена, аналогично проводят поиск взаимодействий по четыре элемента и вычисляют коэффициенты новой модели. Полученную модель анализируют и принимают решение о получении модели или последующих действиях.

Практика решения многочисленных задач показывает, что множество структурных элементов, вводимых в модель, обычно включает взаимодействия не выше тройных и сравнительно редко — четверных взаимодействий.

Если адекватная модель не получена, то среди взаимодействий по два и три, не введенных в модель, выбирают наиболее сильно закоррелированные с \bar{y}_u ($|r_{ij}| \geq 0,6$) и вводят в модель при условии, что их закоррелированность со структурными составляющими, уже введенными в модель, составляет $|r_{ij}| \leq 0,5-0,6$. Полученную модель анализируют по совокупности

критериев качества и принимают окончательное решение о результатах моделирования.

Если получить адекватную математическую модель не удалось, то наиболее вероятными причинами этого могут быть следующие.

1. В математическую модель не введено значительное число статистически малозначимых эффектов.
2. Совокупность результатов экспериментов представляет собой в многомерном пространстве многосвязную (C -, S -образную) область.
3. Исходный выбор уровня сложности описания факторов и взаимодействия факторов не соответствует необходимому, т.е. меньше фактической сложности моделируемой сложной системы.
4. В математическую модель не введены один или несколько статистически значимых эффектов ввиду сложного характера взаимной закоррелированности этих эффектов с другими.

Действия исследователя могут быть следующими.

В первом случае необходимо проанализировать величину и значимость множественного коэффициента корреляции R . Если он достаточно близок к единице и статистически значим (высокозначим), что может быть подтверждено критерием Бокса и Веца γ , то полученная математическая модель имеет информационную ценность, может быть использована в целях прогноза, так как ее использование уменьшает исходную неопределенность при прогнозировании значений критерия качества. Проверки полученной модели на информационную способность и адекватность отличаются и не заменяют друг друга. Вводить статистически малозначимые эффекты в модель не следует.

Во втором случае необходимо исследовать совокупность результатов эксперимента в многомерном пространстве и попытаться представить его в виде отдельных связанных подмножеств. Для каждого отдельного подмножества необходимо получить свою математическую модель.

В третьем случае нужно реализовать последовательный эксперимент путем увеличения числа уровней факторов и общего числа экспериментов. При выборе в качестве начального плана многофакторного регулярного плана эксперимента переход к экспериментам с большим числом опытов следует осуществлять в таких последовательностях: $4 \rightarrow 8 \rightarrow 16 \rightarrow 32 \rightarrow 48 \rightarrow 64 \rightarrow 128$; $9 \rightarrow 18 \rightarrow 27 \rightarrow 36 \rightarrow 54 \rightarrow 72 \rightarrow 81$; $25 \rightarrow 50$; $49 \rightarrow 98$. Планы с такой последовательностью числа опытов характеризуются хорошими статистическими свойствами.

В четвертом случае поступают следующим образом. В последней (новой) версии программного средства "Планирование, регрессия и анализ моделей" имеются три подхода (метода) выбора структуры математической модели. Следует перейти от первого (изложенного) метода ко второму и при необходимости — к третьему. Проанализировать полученные модели и выбрать (по совокупности критериев качества) наилучшую модель.

4.5 Формирование плана эксперимента на основе условия пропорциональности частот уровней факторов

В разделе 4.1 было отмечено, что полный факторный эксперимент соответствует многим хорошим критериям качества. Однако практика реальных прикладных исследований показывает, что следует использовать дробный факторный эксперимент. Необходимо выбрать такой дробный факторный эксперимент, чтобы полученная математическая модель по своим свойствам была близка к свойствам модели, полученной по полному факторному эксперименту.

Дробный факторный эксперимент будет наиболее близок по статистическим свойствам к свойствам полного факторного эксперимента, если для него будет выполняться условие пропорциональности частот уровней факторов [217, с. 37].

Обозначим n_i^p — число появлений p -го уровня i -го фактора, n_j^q — число появлений q -го уровня j -го фактора и n_l^r — число появлений r -го уровня l -го фактора, где $p = 0, 1, \dots, s_p - 1$; $q = 0, 1, \dots, s_q - 1$; $r = 0, 1, \dots, s_r - 1$; $i, j, l = 1, 2, \dots, k$; $i \neq j \neq l$. Для t факторов число одновременных появлений в плане эксперимента указанных уровней факторов обозначим через $n_{ij\dots l}^{pq\dots r}$, для двух факторов — n_{ij}^{pq} , для трех — n_{ijl}^{pqr} .

Рассматриваемый класс планов экспериментов будем называть факторным, если его математическая модель соответствует определенным типам: модель для количественных факторов (чебышевская); модель эффектов уровней и взаимодействий уровней факторов, иначе модель истинных эффектов для качественных факторов.

Факторный план называется регулярным планом мощности t , если для любых t факторов ($2 \leq t \leq k$) плана выполняется условие пропорциональности частот уровней

$$n_{ij\dots l}^{pq\dots r} = n_i^p n_j^q \dots n_l^r / N^{t-1}.$$

Если выполняется условие пропорциональности частот для плана эксперимента, то число совместных появлений в плане любых уровней t факторов в N^{t-1} раз меньше произведения их появлений в отдельности. Планы мощности $t = 2$ называются планами главных эффектов. Все главные эффекты в таких планах ортогональны друг другу.

Область использования многофакторных регулярных планов обширна. Это решение задач оптимизации, моделирования; отсеивание незначимо влияющих факторов, элиминирование (исключение) источников неоднородности.

Планы соответствуют критериям ортогональности (для моделей главных эффектов); D -, Q -оптимальности, если планы равномерные; возможно разбиение плана эксперимента на ортогональные блоки; близость к насы-

ценному плану; композиционность планирования эксперимента без изменения и с изменением числа факторов и уровней и с сохранением критериев ортогональности и D -оптимальности; предельная простота вычислений и интерпретации результатов. В таких планах можно изучить как количественные, так и качественные факторы одновременно в одном плане эксперимента. На число уровней каждого фактора ограничения не накладываются.

Первые работы по факторным планам были выполнены Р. Фишером и Ф. Йетсом; дальнейшее развитие направления связано с работами Д. Финни, Р. Плакетта, Дж. Бермана, С. Аддельмана. В СССР теория и практика многофакторных планов нашла отражение в работах В.З. Бродского, Е.В. Марковой, А.Н. Лисенкова.

Многофакторные регулярные планы могут использоваться в разнообразных научных и технологических исследованиях сложных, многофакторных систем, процессов, объектов. Результаты полного и дробного (регулярные дробные реплики) факторных экспериментов можно эффективно обрабатывать и интерпретировать с использованием аппарата регрессионного анализа, модифицированного и применяемого обычно для обработки результатов многофакторных регулярных планов [217].

Приведенные положительные свойства дробного факторного эксперимента в виде регулярных дробных реплик от полного факторного эксперимента позволяют рекомендовать эти планы в качестве основного класса для получения многофакторных математических моделей технологических систем.

Регулярные дробные реплики целесообразно использовать в виде начальных планов экспериментов при дальнейшем построении последовательных планов экспериментов. Типовым приемом (технологией) перехода от начального плана к последующим (при описании, например, зоны оптимума) с повышением сложности модели может быть следующий. Сохраняя начальные и последующие опыты, можно предложить последовательность планов: 2^2+1 (рис. 4.1, опыты 1–5); $3^2//9$ (опыты 1–9); $3^1 \times 4^1//12$ (опыты 1–12); $4^2//16$ (опыты 1–16); $5^1 \times 4^1//20$ (опыты 1–20); $5^2//25$ (опыты 1–25).

Сложность описания в предложенной последовательности планов была повышена с начальной $(1+X_1)(1+X_2)$ до $(1+X_1+X_1^2+X_1^3+X_1^4) \times (1+X_2+X_2^2+X_2^3+X_2^4)$ конечной. Можно продолжить повышение сложности описания. Отметим, что каждый из приведенной последовательности планов экспериментов характеризуется наилучшими статистическими свойствами.

Для большего числа факторов (X_1, \dots, X_4) разработана такая последовательность планов. Первоначально эксперимент проводится по плану $3^4//9$ (табл. 4.1). Значение фактора X_5 постоянное на определенном выбранном уровне, т.е. $X_5 = const$. После получения модели и ее анализа в случае необходимости можно перейти к плану $3^4//27$ или $3^5//27$ (табл. 4.3). Фактор

X_5 будет изменяться также на трех уровнях. Его можно использовать как новый (введенный), либо как блокочный фактор.

Если число факторов равно трем, то в качестве начального плана можно использовать план $3^3//9$; табл. 4.2, факторы X_1, X_2, X_3 .

В качестве расширенного последовательного плана предложен план $3^3//18$ или $3^3 \times 2^1//18$ (см. табл. 4.2). Во втором плане новый фактор на двух уровнях может быть использован как блокочный. Тогда эксперимент может быть разбит на два ортогональных блока, по 9 опытов в каждом блоке.

Все планы экспериментов характеризуются наилучшими статистическими свойствами.

Планы, построенные на основе условия пропорциональности частот уровней факторов, можно использовать для эвристического построения квазиортогональных планов экспериментов в следующих ситуациях.

1. Сильное ограничение на число проводимых экспериментов.
2. Отсутствие необходимых планов экспериментов для определенного числа уровней факторов.

За основу плана необходимо взять близкий по числу опытов план эксперимента. В качестве исходных планов могут быть выбраны планы $4^5//16$, $5^6//25$, $2^4 \times 4^9//32$, $7^8//49$, $5^{11}//50$, $8^9//64$, $9^{10}//81$ и др.

Для выполнения первого условия план эксперимента разбивают на ортогональные блоки. Выбирают какой-либо фактор (например, первый), но не блокочный. В каждом из блоков вычеркивают строку с различным значением уровней по выбранному фактору. Общее число исключенных опытов равно числу блоков, иначе числу уровней блокочного фактора $s_{бл}$.

Оставшиеся опыты представляют квазиоптимальный план эксперимента, статистические характеристики которого нельзя улучшить без увеличения числа возможных опытов. Потеря наилучших статистических свойств исходных планов зависит от числа исключенных из них опытов и "равномерности" исключенных опытов по уровням факторов.

Для решения второй группы задач необходимо выбрать план эксперимента с наилучшими статистическими свойствами и набором уровней факторов, максимально близким и меньшем к требуемому набору уровней, для которых построение плана эксперимента существующими методами невозможно при приемлемом числе опытов. Выбранный план эксперимента разбивают на ортогональные блоки. Их число $n_{бл}$ должно быть $n_{бл} = N/s_{ф}$ ($s_{ф}$ — число уровней фактора, некоторые из которых будут заменены на иные уровни). Выбирают факторы, число уровней которых наиболее близко к числу уровней тех факторов, для которых построить план с наилучшими статистическими свойствами невозможно, и в каждом блоке заменяют по одному уровню фактора на большее значение уровня. В различных блоках заменяют различные неоднородные уровни факторов. Общее число измененных уровней в плане эксперимента должно быть равно или близко к

Таблица 4.1 План эксперимента
 $3^4/9$

№ опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	0	0	0	0	0
2	1	1	1	0	0
3	2	2	2	0	0
4	0	1	2	1	0
5	1	2	0	1	0
6	2	0	1	1	0
7	0	2	1	2	0
8	1	0	2	2	0
9	2	1	0	2	0

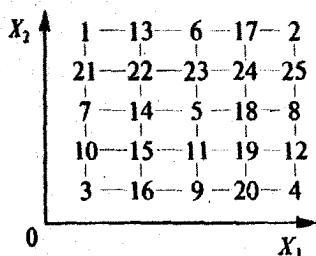


Рис. 4.1. Последовательность расположения опытов в факторном пространстве X_1, X_2 .

Таблица 4.2 План эксперимента $3^3 \times 2^1 / 18$

№ оп.	X_1	X_2	X_3	X_4
1	0	0	0	0
2	1	1	1	0
3	2	2	2	0
4	0	1	2	0
5	1	2	0	0
6	2	0	1	0
7	0	2	1	0
8	1	0	2	0
9	2	1	0	0
10	0	1	1	1
11	1	2	2	1
12	2	0	0	1
13	0	0	2	1
14	1	1	0	1
15	2	2	1	1
16	0	2	0	1
17	1	0	1	1
18	2	1	2	1

Таблица 4.3 План эксперимента $3^5 / 27$

№ оп.	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	0	0	0	0	0
2	1	1	1	0	0
3	2	2	2	0	0
4	0	1	2	1	0
5	1	2	0	1	0
6	2	0	1	1	0
7	0	2	1	2	0
8	1	0	2	2	0
9	2	1	0	2	0
10	0	0	2	1	1
11	1	1	0	1	1
12	2	2	1	1	1
13	0	1	1	2	1
14	1	2	2	2	1
15	2	0	0	2	1
16	0	2	0	0	1
17	1	0	1	0	1
18	2	1	2	0	1
19	0	0	1	2	2
20	1	1	2	2	2
21	2	2	0	2	2
22	0	1	0	0	2
23	1	2	1	0	2
24	2	0	2	0	2
25	0	2	2	1	2
26	1	0	0	1	2
27	2	1	1	1	2

числу встречаемости уровней фактора, которые заменяют на другие уровни. Полученный план эксперимента является квазиоптимальным для принятого числа опытов.

Приведенные эвристические рекомендации были использованы при получении планов экспериментов $3^3 \times 4^2 \times 9^1 \times 4^1 // 32$ и $3^3 \times 4^1 \times 5^1 \times 8^1 \times 4^1 // 32$ для математического моделирования испытаний летательных аппаратов в естественных условиях [233, с. 74–76]. Они были использованы для оценки заливаемости двигателей на самолетах-амфибиях и гидросамолетах. Количественно залитаемость F_3 — это объемное содержание воды, попавшей в проточную часть двигателя. Заливаемость силовой установки самолета F_3 является сложной функцией, зависящей от многих факторов, которые принято подразделять на конструктивные, определяющие гидрометеосостояние и условия эксплуатации. Всего необходимо учитывать влияние 17 факторов.

При формировании матриц экспериментов (испытаний) по оценке заливаемости силовой установки было проведено ранжирование их (методом экспертных оценок) на предмет включения в определенные режимы эксплуатации летательных аппаратов.

1. Взлет при смешанном волнении, ветровом волнении, зыби.
2. Рулежка при смешанном волнении, ветровом волнении, зыби.
3. Циркуляции (для всех типов волнения).

Приведенные планы были разработаны для некоторых режимов. Сильное ограничение на число проводимых экспериментов не позволило предложить планы с $N > 32$. Однако построить оптимальные планы с числом уровней 9 (для первого плана) и числом уровней 5 и 8 (для второго плана) известными методами невозможно.

Анализ предложенных планов численными методами показал следующее. Для плана $3^3 \times 4^2 \times 9^1 \times 4^1 // 32$ среднее абсолютное значение парного коэффициента корреляции закоррелированных столбцов составляет $|\bar{r}_{ij}| = 0,066$, максимальное абсолютное — $\max |r_{ij}| = 0,236$. Для плана $3^3 \times 4^1 \times 5^1 \times 8^1 \times 4^1 // 32$ — $|\bar{r}_{ij}| = 0,107$, $\max |r_{ij}| = 0,392$. Все значения следует признать достаточно хорошими.

Получение линейных относительно параметров полиномиальных математических моделей (в вещественном евклидовом пространстве) с использованием многофакторных регулярных (и желательно равномерных) планов экспериментов наиболее эффективно в системном формализованном описании технологических и других систем.

Использование эвристического подхода в конструировании многофакторных планов экспериментов на основе условия пропорциональности частот уровней факторов позволяет получать квазиоптимальные математические модели в таких прикладных условиях исследования, в которых получение решения строгими математическими методами неизвестно или невозможно.

4.6 Синтез многофакторных последовательных квази-*D*-оптимальных планов экспериментов

Многообразие прикладных задач по математическому моделированию сложных систем часто требует многофакторных планов экспериментов для получения математических моделей с таким числом опытов и сочетанием уровней факторов, которые отсутствуют в известных каталогах. Теория многофакторных регулярных планов экспериментов в общем случае не разработана для последовательной схемы проведения многофакторного экспериментального исследования. Указанные причины стимулируют разработку многофакторных последовательных планов экспериментов с наилучшими статистическими свойствами для произвольного необходимого набора уровней факторов и числа экспериментов. Предлагаемый подход генерации планов экспериментов численными методами был предложен автором в 1989 г. Он включает в себя алгоритмы и программное обеспечение на ЕС ЭВМ для получения многофакторных планов экспериментов, а также анализа и исследования ранее полученных планов.

Составляется список факторов, числа уровней каждого фактора, числа опытов в каждом блоке эксперимента, числа опытов для начального и последующего (в случае последовательного планирования эксперимента) планов экспериментов. Если представляется возможным, в качестве начального и последующего планов экспериментов выбирают из каталогов известные многофакторные равномерные регулярные планы экспериментов, которые в наибольшей степени (но не полностью) удовлетворяют необходимым сформулированным требованиям.

Идея составления плана эксперимента заключается в последовательном случайном формировании столбцов по каждому фактору плана эксперимента. Генерация начального и последующих планов экспериментов осуществляется поблочно.

Выбор уровней любого фактора для включения в план эксперимента равновероятный по отношению к другим уровням этого фактора. Если число опытов в блоке больше числа уровней, то столбец заполняется в несколько циклов. Число циклов равно числу опытов в блоке, деленному на число уровней фактора. Если число циклов — не целое, то формируются фиктивные уровни для фактора из числа уже выбранных уровней. Число циклов может быть и дробным.

В каждом цикле выбора уровней факторов каждый уровень должен встречаться только один раз (при дробном числе циклов это условие не выполняется). Выбор уровней продолжается до полного заполнения каждого столбца. Если существуют уже проведенные эксперименты, то их включают в план соответственно значениям каждого фактора. Можно включать значения уровней факторов по столбцам, по строкам и совместно.

Столбцы матрицы плана выбирают исходя из критерия максимальной близости к ортогональным. Каждый столбец матрицы плана проверяют на ортогональность с остальными, для чего вычисляют коэффициенты парной корреляции. Если за заданное число проверок не найден столбец, удовлетворяющий условию, что коэффициент парной корреляции данного столбца с другими столбцами (уже выбранными) меньше заданного значения ($|r(X_i, X_j)| \leq 0,2-0,4$), то выбирают столбец с наименьшим полученным коэффициентом парной корреляции и заносят в блок формируемого плана эксперимента.

Полученный блок эксперимента анализируют по критериям, показывающим, насколько все главные эффекты близки к ортогональным. Критериями, характеризующими совместную мультиколлинеарность главных эффектов, иначе сопряженность независимых переменных, могут быть число обусловленности μ и среднее абсолютное значение коэффициентов парной корреляции главных эффектов друг относительно друга $|\bar{r}(X_i, X_j)|$. Если блок удовлетворяет выбранным значениям μ и $|\bar{r}(X_i, X_j)|$, то он запоминается и вносится в формируемый план эксперимента, в противном случае — не запоминается и переходят к формированию второго блока экспериментов.

После формирования необходимого числа блоков плана эксперимента с учетом возможной последовательной схемы его проведения анализируют начальный и последовательный планы эксперимента. Для этого берут по два, по три и т.д. блока плана эксперимента (всевозможные сочетания) и вычисляют значения μ и $|\bar{r}(X_i, X_j)|$. Для начального плана выбирают наилучшие сочетания либо по два, либо по три блока в зависимости от числа необходимых опытов. Качественный и количественный анализы разработанных планов экспериментов показали, что для успешной реализации предложенного подхода желательно использовать ЭВМ со сравнительно большим быстродействием. В реальной практике решения задач такая техника у исследователя не всегда может быть. Поэтому необходимо на основе условия пропорциональности частот уровней факторов частично заполнить столбцы для тех факторов, которые удовлетворяют по сочетанию уровней этому условию в различных блоках генерируемого плана эксперимента. Тем самым частично план будет синтезирован, что сократит необходимый объем вычислений.

Информационные возможности изложенного подхода по синтезу многофакторных последовательных квази- D -оптимальных планов экспериментов описаны в разделе 4.8.

4.7 Планирование эксперимента на основе ЛП_T равномерно распределенных последовательностей

Рассмотренные методы получения планов экспериментов базируются на регулярных (в определенном смысле правильных) построениях. Формирование различных критериев качества, предъявляемых к коэффициентам математической модели и отклику (критерию качества технологической системы), в большинстве сформулированных критериев сводится к получению их экстремальных значений. Большинство критериев имеют статистическую основу, первичными (исходными) понятиями для получения их служат матрица плана эксперимента и теоретическое значение дисперсии воспроизводимости результатов экспериментов $\sigma^2(\varepsilon)$.

Среди известных (примерно до 15–22) критериев качества планов экспериментов слабо разработаны и практически не используются в прикладных исследованиях критерии, позволяющие выбрать правильную структуру математической модели полиномиального типа, линейную относительно параметров. Концепция случайного размещения в многофакторном пространстве точек плана эксперимента (по известным публикациям) не привлекается и не используется.

Проблема выбора системы точек в многомерном пространстве при численных методах решения разнообразных задач была поставлена Г. Вейлем (H. Weyl) в 1916 г. Решение многих прикладных системных задач характеризуется сочетанием ограничения выделенных ресурсов на исследование с отсутствием необходимой полезной информации для принятия оптимальных регулярных решений с использованием вскрытия механизмов происходящих явлений (задачи по сложным системам) или получения результата в формульном виде (математические задачи). Типичные задачи для указанных условий — приближенные вычисления многомерных интегралов, многокритериальная оптимизация в системной (многофакторной) постановке, проведение вычислительного эксперимента с пробными точками (исследование пространства параметров) и др.

В указанных задачах используют равномерно распределенные последовательности точек в многомерном пространстве, в стандартной постановке — многомерном единичном кубе $(0,1)$ с последующим переходом к произвольному многомерному параллелепипеду [234, 235].

В разделе 4.3 было показано, что традиционное использование планирования эксперимента (регулярный подход) предполагает структуру модели заданной, а саму модель — адекватной отображаемой системе исходных данных, полученных в результате проведенных экспериментов. Было высказано мнение, что в условиях недостатка априорной информации о сложной моделируемой системе постулирование модели не гарантирует ее адекватность. При поиске структуры многофакторной математической модели по результатам экспериментов расположение точек плана эксперимента может

быть регулярным или случайным. Так как информация о виде (структуре) многофакторной модели в большинстве реальных ситуаций для исследователя отсутствует, то расположение точек плана эксперимента в виде регулярной системы (например, как показано на рис. 4.1, для $k = 2$) позволяет получить по пять, а в общем случае s_i , причем $s_i < N$ (!) различных значений критерия качества технологической системы y_j по каждому из двух факторов. При этом общее количество экспериментов $N = 25$.

Если ограничиться этим количеством возможных экспериментов и расположить координаты значений факторов в многомерном пространстве случайным равномерно распределенным образом в тех же интервалах, что и в регулярном варианте, то по каждому из факторов можно получить 25 различных значений искомой зависимости, в общем случае $N = s_i$ (!). Оптимальность расположения точек заключается в их равномерности в пространстве R^2 (рис. 4.2).

Отметим, что можно поставить задачу равномерного расположения этих же точек плана эксперимента ($N = 25$) не только в пространстве R^2 , но и в пространствах большей размерности, например, $k = 3-60$ и более и при тех же ресурсах получить по 25 различных значений критерия качества от каждого из 3-60 факторов.

Равномерное расположение точек в многомерном пространстве известно как ЛП_T равномерно распределенные (р.р.) последовательности [234, с. 14]. Теория их построения, алгоритмы получения и свойства приведены в многочисленных работах д.ф.-м.н. И.М. Соболя [234, с. 102-106].

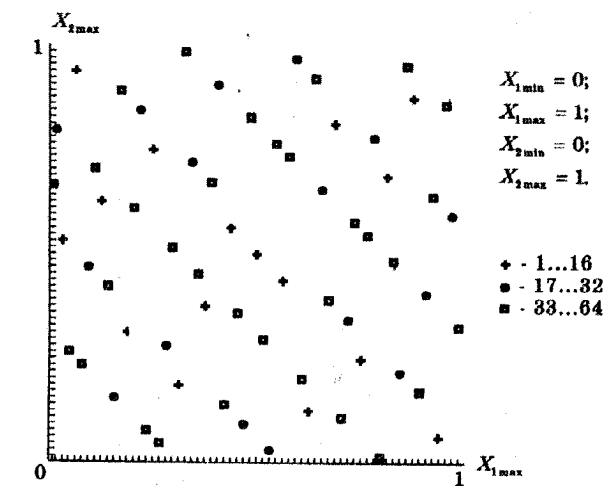
ЛП_T р.р. последовательности характеризуются следующими замечательными свойствами: проекции N точек в k -мерном пространстве на любую $(k-j)$ -мерную грань ($1 \leq j \leq k-1$) многомерного единичного куба образуют также р.р. последовательность и, следовательно, содержат N проекций точек.

Равномерное распределение точек плана эксперимента в любом многомерном пространстве уже при сравнительно малом количестве точек $N = 16-64$ — в технологических экспериментах и получении математических моделей (табл. 4.4) и $N = 64-256$ в вычислительном эксперименте — при аппроксимации результатов, полученных методом статистических испытаний или сложных аналитических зависимостей, позволяет получать сравнительно слабо закоррелированные главные эффекты и эффекты взаимодействий факторов при выборе структуры математической модели.

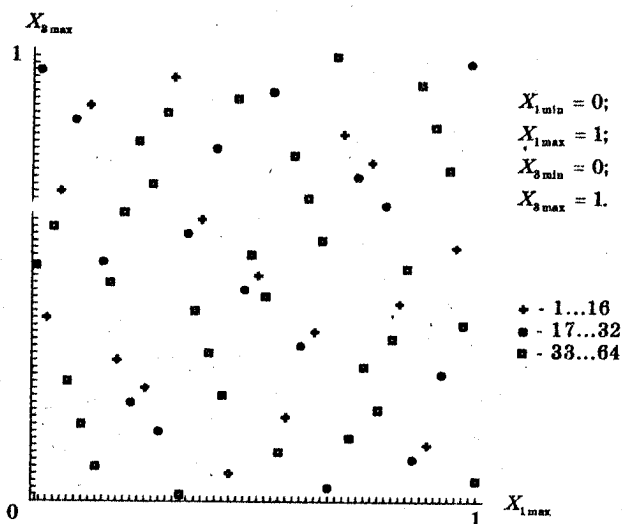
ЛП_T р.р. последовательности позволяют по сравнению с регулярными планами получить расположение точек плана эксперимента, более близкое к тем точкам многомерного пространства отклика, в которых эта поверхность принимает экстремальные значения и имеет точки перегиба. Именно эти точки определяют границы изменения характера направления кривой линии, а в многомерном пространстве — криволинейной поверхности. В задачах аппроксимации многомерных поверхностей отклика эти точки (экстремума и

Таблица 4.4 ЛП_τ равномерно распределенные последовательности для $0 \leq x_1, \dots, x_3 \leq 1$

№ проб. точки	Кодированные значения факторов			№ проб. точки	Кодированные значения факторов		
	x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3
1	0,5	0,5	0,5	33	0,515625	0,296875	0,453125
2	0,25	0,75	0,25	34	0,265625	0,046875	0,703125
3	0,75	0,25	0,75	35	0,765625	0,546875	0,203125
4	0,125	0,625	0,875	36	0,140625	0,421875	0,078125
5	0,625	0,125	0,375	37	0,640625	0,921875	0,578125
6	0,375	0,375	0,625	38	0,390625	0,671875	0,328125
7	0,875	0,875	0,125	39	0,890625	0,171875	0,828125
8	0,0625	0,9375	0,6875	40	0,078125	0,234375	0,265625
9	0,5625	0,4375	0,1875	41	0,578125	0,734375	0,765625
10	0,3125	0,1875	0,9375	42	0,328125	0,984375	0,015625
11	0,8125	0,6875	0,4375	43	0,828125	0,484375	0,515625
12	0,1875	0,3125	0,3125	44	0,203125	0,609375	0,640625
13	0,6875	0,8125	0,8125	45	0,703125	0,109375	0,140625
14	0,4375	0,5625	0,0625	46	0,453125	0,359375	0,890625
16	0,9375	0,0625	0,5625	47	0,953125	0,859375	0,390625
16	0,03125	0,53125	0,40625	48	0,046875	0,265625	0,609375
17	0,53125	0,03125	0,90625	49	0,546875	0,765625	0,109375
18	0,28125	0,28125	0,15625	50	0,296875	0,515625	0,859375
19	0,78125	0,78125	0,65625	51	0,796875	0,015625	0,359375
20	0,15625	0,15625	0,53125	52	0,171875	0,890625	0,484375
21	0,65625	0,65625	0,03125	53	0,671875	0,390625	0,984375
22	0,40625	0,90625	0,78125	54	0,421875	0,140625	0,234375
23	0,90625	0,40625	0,28125	55	0,921875	0,640625	0,734375
24	0,09375	0,46875	0,84375	56	0,109375	0,703125	0,171875
25	0,59375	0,96875	0,34375	57	0,609375	0,203125	0,671875
26	0,34375	0,71875	0,59375	58	0,359375	0,453125	0,421875
27	0,84375	0,21875	0,09375	59	0,859375	0,953125	0,921875
28	0,21875	0,84375	0,21875	60	0,234375	0,078125	0,796875
29	0,71875	0,34375	0,71875	61	0,734375	0,578125	0,296875
30	0,46875	0,09375	0,46875	62	0,484375	0,828125	0,546875
31	0,96875	0,59375	0,96875	63	0,984375	0,328125	0,046875
32	0,015625	0,796875	0,953125	64	0,007812	0,664063	0,523438

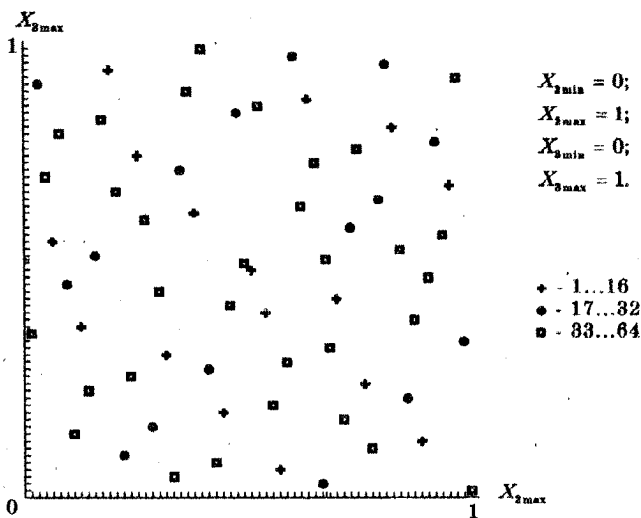


a)

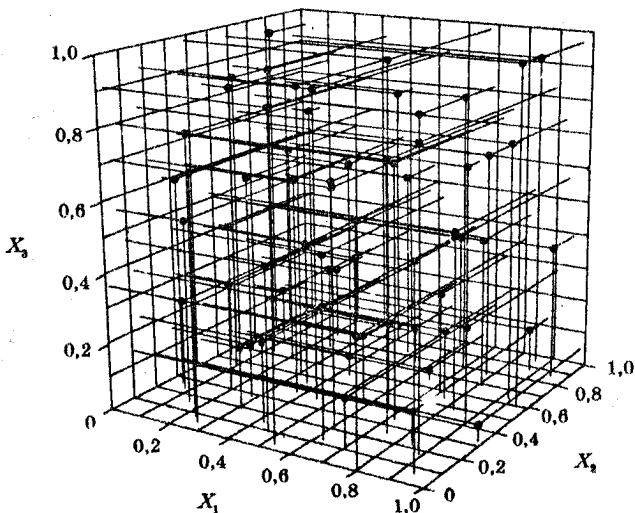


б)

Рис. 4.2. Расположение точек ЛПт равномерно распределённых последовательностей в факторных пространствах
 а) X_1, X_2 ; б) X_1, X_2 .



в)



г)

Рис. 4.2. Расположение точек ЛШТ равномерно распределённых последовательностей в факторных пространствах
 а) X_2, X_3 ; г) X_1, X_2, X_3 .

перегиба) являются наиболее информативными для получения правильной структуры многофакторной математической модели. Известно, что ЛП_T р.р. последовательности используются в задачах многофакторной оптимизации для поиска экстремальных значений критериев качества [234, с. 28–35, 66–81; 235, с. 30–32].

Рассмотрим расположение ЛП_T р.р. последовательностей (рис. 4.2 г) для совокупностей точек $N = 16; 32; 64$ в трехмерном пространстве $k = 3$. На рис. 4.2 а, б, в показано расположение совокупностей указанных точек в подпространствах меньших размерностей: $k = 2$ для сочетания факторов X_1, X_2, X_3 . Проекции точек на координатные оси обозначены метками, повернутыми в сторону точек. Анализируя расположение совокупностей точек $N_1 = 1-16, N_2 = 17-32$ и $N_3 = 33-64$, можно установить, что положения их координат по каждой из осей перемежаются между указанными тремя совокупностями и равномерно расположены в каждой из совокупностей и по каждому фактору X_i .

Начальную совокупность точек плана эксперимента N_1 следует рассматривать как начальный план эксперимента при последовательной схеме проведения экспериментов, а совокупности N_2 и N_3 – как дополнительные. Решение об их проведении принимается после анализа полученных результатов математического моделирования по предшествующим совокупностям. С увеличением числа опытов N вероятность получения в плане эксперимента точек, достаточно близких к точкам экстремума и перегиба поверхности отклика, стремится к единице.

При использовании ЛП_T р.р. последовательностей в качестве планов для получения многофакторных математических моделей необходимо учитывать следующее. Они обеспечивают: наилучшее (из известных планов) выявление структуры многофакторных математических моделей; близость всех эффектов к ортогональным и, следовательно, высокую устойчивость коэффициентов модели; простоту и доступность проведения по любой схеме последовательного эксперимента; возможность введения в план эксперимента значительного числа факторов ($k = 20-50$ (80)) при сравнительно небольшом числе опытов ($N = 64-128$ (256)).

К недостаткам указанных планов следует отнести значительное число уровней по каждому фактору ($s_i = N$) и необходимость обеспечить и поддерживать в процессе экспериментирования значения этих уровней с высокой точностью; несоответствие традиционным статистическим критериям, которые обычно используются в регулярных планах экспериментов. Из приведенных недостатков следует, что ЛП_T р.р. последовательности не следует использовать в тех ситуациях, когда не обеспечивается необходимая точность поддержания значений уровней факторов и результатов экспериментов.

Использование указанного подхода будет наилучшим при получении исходных данных методом статистических испытаний (метод Монте-Карло) и при аппроксимации сложных аналитических зависимостей с целью более упрощенного описания и подробного анализа влияния системы факторов.

В исследованиях технологических систем желательно использовать предметно ориентированные автоматизированные системы научных исследований, позволяющие более надежно и системно обеспечить проведение многофакторного и многокритериального эксперимента, фиксации значений факторов и критериев качества [213, с. 9] с последующим получением математических моделей.

4.8 Информационные возможности различных планов последовательного проведения эксперимента

В разделах 4.5–4.7 были рассмотрены различные подходы в последовательной многофакторной схеме получения "наилучшего" уравнения регрессии и проведения экспериментального исследования. Каждый из подходов характеризуется определенными преимуществами и недостатками и вытекающими из них информационными возможностями.

Рассмотрим информационные возможности различных подходов.

Многофакторные регулярные планы характеризуются многими замечательными свойствами. Их использование наиболее эффективно в тех ситуациях, когда из априорной информации известна сложность поведения факторов и для необходимого числа факторов и их уровней имеется подходящий план эксперимента. Если он отсутствует, необходимо использовать эвристическое построение квазиортогональных планов экспериментов (см. раздел 4.6).

Предложенный подход и разработанная технология использования многофакторных регулярных планов экспериментов были опробованы в решениях многих десятков реальных прикладных задач в системной постановке. Типичные информационные результаты с использованием многофакторных регулярных планов были получены В.А. Орлюком в 1987–1989 г.г. [236, с. 25–26; 237, с. 33–38].

В исследованиях технологического обеспечения собираемости многоэлементных конструкций в условиях роботизированной сборки с использованием многофакторных регулярных равномерных планов экспериментов изучали влияние 37 факторов (выбранных из 168 проанализированных) на 19 критериев качества. Были получены 19 многофакторных математических моделей [238, с. 257–258, табл. П4.9].

Модели характеризуются следующими критериями качества.

1. Все математические модели адекватны.
2. Коэффициенты множественной корреляции $R = 0,977–0,999$; $F_{расч} = =20,4–18736$. Все модели информативны.

3. Число обусловленности для 5 моделей $cond = 1,0$. Для остальных 14 моделей $cond = 1,26-3,84$. Коэффициенты всех моделей высокоустойчивые.
4. Средняя погрешность аппроксимации исходных данных $\bar{\varepsilon}_y = 1,78-6,98 \%$, т.е. среднее значение для всех моделей менее 5 %.
5. Доля рассеивания, объясняемая моделью, $\hat{Q}_y = 95,5-99,9 \%$.

Для получения моделей были использованы пакет прикладных программ "Планирование, регрессия и анализ моделей" и разработанная технология применения многофакторных регулярных планов [238, с. 126].

Полученные математические модели по заключению автора исследования к.т.н. В.А. Орлюка "обладают качествами, позволяющими их использовать при проектировании технологического процесса роботизированной сборки многоэлементных конструкций для расчета точности и стабильности работы технологической системы и ее подсистем, а также вероятности безотказной сборки в рамках проектируемого сборочного робототехнологического комплекса. Особый интерес представляет зависимость, отражающая взаимосвязь исходных погрешностей технологической системы и наибольшее вероятное отклонение погрешности взаимного расположения поверхностей сопряжения" [239, с. 11].

Были исследованы информационные возможности последовательных планов экспериментов $3^3//9 \rightarrow 3^3//18$ и $3^4//9 \rightarrow 3^4//27$ или $3^5//27$, полученных в разделе 4.5. На рис. 4.3 показана диаграмма распределения коэффициентов парной корреляции плана $3^3//18$ для 6 главных эффектов и 20 взаимодействий факторов, т.е. для всех возможных. 54,5 % всех эффектов ортогональны, а 99,1 % — закоррелированы между собой с коэффициентом парной корреляции $|\bar{r}(x_{iu}^{(p)}, x_{ju}^{(q)})| \leq 0,3$. Среднее абсолютное значение коэффициентов корреляции $|\bar{r}(x_{iu}^{(p)}, x_{ju}^{(q)})| = 0,069$. Приведенные информационные характеристики считают достаточно хорошими.

На рис. 4.4 и 4.5 показаны результаты анализа планов $3^4//27$ и $3^5//27$. Были проанализированы все главные эффекты и взаимодействия факторов до четверных взаимодействий включительно. Для плана $3^4//27$ проанализированы 80 эффектов, а для плана $3^5//27$ — 210 эффектов. Приведенные на рис. 4.4 и 4.5 информационные характеристики следует считать хорошими.

В качестве многофакторного последовательного квази- D -оптимального плана эксперимента был проанализирован план $2^2 \times 3^3 \times 4^1 \times 3^1//27$. План был сгенерирован по блокам; в каждом блоке было 9 экспериментов. Фактор 3^1 в обозначении плана — блокочный, на трех уровнях. Для всех главных эффектов факторов (кроме блокочного) и парных взаимодействий линейных эффектов факторов была составлена расширенная матрица плана экспери-

мента. Для 11 главных эффектов и 15 взаимодействий факторов были вычислены коэффициенты парной корреляции и представлены в виде долей процента по интервалам 0,00—0,10; ...; 0,90—1,00 (табл. 4.5).

Анализ полученных результатов показал, что по 3 блокам экспериментов закоррелированность эффектов с $|r_{ij}| < 0,3$ была в пределах 72,9—79,2 %, при объединении 1- и 2-го блока — 91,7 %; всех трех блоков — 95,8%. Как и следовало ожидать, с увеличением числа экспериментов закоррелированность эффектов уменьшается. Приведенные результаты следует признать хорошими.

Анализ информационных возможностей ЛПТ р.р. последовательностей целесообразно провести для планов экспериментов с $k = 8$, $N = 32$ и $k = 20$, $N = 64$. Первый план является типичным для большинства исследований и числа факторов, второй план используется для проведения сложных исследований со значительным числом факторов. Практика многих лет решения прикладных задач показывает, что ресурсные возможности задач технологического эксперимента ограничиваются числом опытов $N \approx 64$.

Для первого плана эксперимента в расширенную матрицу эффектов были введены главные эффекты до третьей степени включительно (24 эффекта) и взаимодействия по два элемента (252 взаимодействия). Всего было проанализировано 276 эффектов.

На рис. 4.6 показана диаграмма распределения коэффициентов парной корреляции в процентах по интервалах 0,0; 0,0—0,1; ...; 0,9—1,0. Закоррелированность эффектов в исследуемой расширенной матрице с $|r_{ij}| < 0,3$ составила 94 %. Среднее абсолютное значение коэффициентов парной корреляции по всей расширенной матрице $|\bar{r}_{ij}| = 0,0822$.

Во втором плане эксперимента в расширенную матрицу эффектов были введены главные эффекты также до третьей степени включительно (60 эффектов) и взаимодействия факторов по два элемента с ограничением по степени эффекта до двух (190 взаимодействий). Всего было проанализировано 250 эффектов.

Результаты анализа приведены на рис. 4.7. Закоррелированность эффектов в расширенной матрице с $|r_{ij}| < 0,3$ составила 93,3 %. Среднее абсолютное значение коэффициентов парной корреляции по всей расширенной матрице $|\bar{r}_{ij}| = 0,0898$.

По обоим анализируемым планам экспериментов закоррелированность исследованных эффектов достаточно малая. Сравнительно высокую закоррелированность имеет незначительная доля эффектов — 6,0% по первому плану и 6,7% по второму. Полученные математические модели по этим планам экспериментов с произвольной структурой будут устойчивыми.

Интервал	Доля, %	Диаграмма распределения коэффициентов корреляции
$0,0 = \text{COR} = 0,0$	54,5	oooooooooooooooooooooooooooooooo
$0,0 < \text{COR} < 0,1$	10,2	oooooo
$0,1 \leq \text{COR} < 0,2$	27,1	oooooooooooooooooooo
$0,2 \leq \text{COR} < 0,3$	7,4	oooo
$0,3 \leq \text{COR} < 0,4$	0,9	o
$0,4 \leq \text{COR} < 0,5$	0,0	
$0,5 \leq \text{COR} < 0,6$	0,0	
$0,6 \leq \text{COR} < 0,7$	0,0	
$0,7 \leq \text{COR} < 0,8$	0,0	
$0,8 \leq \text{COR} < 0,9$	0,0	
$0,9 \leq \text{COR} < 1,0$	0,0	

Среднее значение коэффициентов корреляции – 0,068703

Среднее квадратичное отклонение – 0,006853

Рис. 4.3. Анализ последовательного плана эксперимента $3^3//18$ до тройных взаимодействий включительно (6 + 20)

Интервал	Доля, %	Диаграмма распределения коэффициентов корреляции
$0,0 = \text{COR} = 0,0$	89,3	oo
$0,0 < \text{COR} < 0,1$	0,0	
$0,1 \leq \text{COR} < 0,2$	2,0	o
$0,2 \leq \text{COR} < 0,3$	4,4	oo
$0,3 \leq \text{COR} < 0,4$	2,4	o
$0,4 \leq \text{COR} < 0,5$	1,3	o
$0,5 \leq \text{COR} < 0,6$	0,3	
$0,6 \leq \text{COR} < 0,7$	0,3	
$0,7 \leq \text{COR} < 0,8$	0,0	
$0,8 \leq \text{COR} < 0,9$	0,0	
$0,9 \leq \text{COR} < 1,0$	0,0	

Среднее значение коэффициентов корреляции – 0,031503

Среднее квадратичное отклонение – 0,009509

Рис. 4.4. Анализ последовательного плана эксперимента $3^4//27$ до четверных взаимодействий включительно (8 + 72)

Интервал	Доля, %	Диаграмма распределения коэффициентов корреляции
0,0=COR=0,0	63,3	oo
0,0<COR<0,1	6,4	oooo
0,1≤COR<0,2	9,2	oooooo
0,2≤COR<0,3	7,1	ooooo
0,3≤COR<0,4	4,4	oo
0,4≤COR<0,5	1,6	o
0,5≤COR<0,6	1,1	o
0,6≤COR<0,7	1,4	o
0,7≤COR<0,8	1,7	o
0,8≤COR<0,9	0,6	
0,9≤COR<1,0	3,1	oo

Среднее значение коэффициентов корреляции — 0,119566

Среднее квадратичное отклонение — 0,053290

Рис. 4.5. Анализ последовательного плана эксперимента $3^5/27$ до четверных взаимодействий включительно (10 + 200)

Таблица 4.5 Распределение значений коэффициентов парной корреляции в расширенной матрице плана эксперимента $2^2 \times 3^3 \times 4^1 / 27$

Интервалы значений коэффициентов парной корреляции	Количество коэффициентов по интервалам, %				
	Блоки				
	1	2	3	1-2	3
	Опыты				
	9	9	9	18	27
0,00—0,10	37,0	37,0	35,5	55,8	63,1
0,10—0,20	24,1	20,1	23,9	22,1	18,7
0,20—0,30	18,1	15,8	14,7	13,8	14,0
0,30—0,40	6,5	12,0	8,6	4,6	2,3
0,40—0,50	3,2	2,7	8,1	1,7	0,9
0,50—0,60	4,6	4,9	5,1	0,8	0,5
0,60—0,70	2,8	3,3	0,5	0	0,5
0,70—0,80	1,4	2,2	2,5	0	0
0,80—0,90	2,3	1,1	1,0	1,3	0
0,90—1,00	0	1,1	0	0	0
0,00—0,30	79,2	72,9	74,1	91,7	95,8

Интервал	Доля, %	Диаграмма распределения коэффициентов корреляции
$0,0 = \text{COR} = 0,0$	47,3	oooooooooooooooooooooooooooo
$0,0 < \text{COR} < 0,1$	20,5	oooooooooooo
$0,1 \leq \text{COR} < 0,2$	16,6	oooooooooooo
$0,2 \leq \text{COR} < 0,3$	9,6	oooooo
$0,3 \leq \text{COR} < 0,4$	3,5	oo
$0,4 \leq \text{COR} < 0,5$	1,9	o
$0,5 \leq \text{COR} < 0,6$	0,5	
$0,6 \leq \text{COR} < 0,7$	0,1	
$0,7 \leq \text{COR} < 0,8$	0,0	
$0,8 \leq \text{COR} < 0,9$	0,0	
$0,9 \leq \text{COR} < 1,0$	0,1	

Среднее значение коэффициентов корреляции — 0,082203

Среднее квадратичное отклонение — 0,013540

Рис. 4.6. Анализ ЛП_Г плана эксперимента $N = 32$, $k = 8$ до двойных взаимодействий включительно (24 + 252)

Интервал	Доля, %	Диаграмма распределения коэффициентов корреляции
$0,0 = \text{COR} = 0,0$	50,4	oooooooooooooooooooooooooooo
$0,0 < \text{COR} < 0,1$	34,4	oooooooooooooooooooo
$0,1 \leq \text{COR} < 0,2$	6,6	ooo
$0,2 \leq \text{COR} < 0,3$	1,9	o
$0,3 \leq \text{COR} < 0,4$	0,5	
$0,4 \leq \text{COR} < 0,5$	0,4	
$0,5 \leq \text{COR} < 0,6$	0,6	
$0,6 \leq \text{COR} < 0,7$	0,1	
$0,7 \leq \text{COR} < 0,8$	0,1	
$0,8 \leq \text{COR} < 0,9$	0,9	o
$0,9 \leq \text{COR} < 1,0$	4,0	oo

Среднее значение коэффициентов корреляции — 0,089773

Среднее квадратичное отклонение — 0,050377

Рис. 4.7. Анализ ЛП_Г плана эксперимента $N = 64$, $k = 20$ до двойных взаимодействий включительно с ограничением их степени до двух (60 + 190)

Отметим, что для более обширного анализа всех рассмотренных и других планов экспериментов необходима вычислительная техника с более мощными вычислительными возможностями как по объему памяти, так и по быстродействию.

Общий вывод по разделу 4.8. Приведенные информационные результаты по трем классам планов последовательного проведения экспериментов обеспечивают устойчивость коэффициентов при автоматизированном выборе семантической структуры математической модели и позволяют рекомендовать их к использованию в прикладных технологических исследованиях.

4.9 Основные выводы

Помимо сформулированного математического метода решения задач в прикладных областях необходима разработка подробной технологии реализации математических абстракций в реальной предметной действительности. Основные свойства (атрибуты) этой действительности — физическая системность технологической предметной области и ограничения разнообразных ресурсов, необходимых для реализации абстрактных математических рекомендаций в реальную действительность.

Выработка и отладка технологии реализации математических методов неизбежно привлекает разнообразные "мелкие" уточнения общих рекомендаций математического алгоритма, многие из которых вначале воспринимаются как эмпирические рекомендации.

Статус математической теории здесь аналогичен значению партитуры музыкального произведения или текста пьесы, от уровня интерпретации которых и создается восприятие (воплощение) их в реальной действительности. Теоретические возможности предложенных математических алгоритмов, как и выдающиеся художественные возможности произведений, еще не обеспечивают (сами по себе) достаточно хорошую их интерпретацию при решении прикладных задач.

Американский специалист в области вычислительной математики, бывший президент ассоциации по вычислительным машинам, руководитель математической службы "Bell Telephone Laboratories" Р.В. Хемминг считает, что главными инструментами здесь являются "общее чутье" и "маленькие хитрости". Аспект "маленьких хитростей" является важной частью искусства вычисления [240, с. 90]. Решение прикладных задач требует принятия принципов: "цель расчетов — понимание, а не числа" и "прежде чем решать задачу, подумай, что делать с ее решением" [240, с. 13, 392–393]. Итоговая формулировка подробной технологии использования математического алгоритма в реальной технологической области может быть сделана лишь на основе анализа значительного количества решенных задач.

Получение многофакторных математических моделей реальных технологических систем должно учитывать следующие системные условия.

1. Отсутствие необходимой априорной информации о структуре математической модели и, следовательно, о сложности описания моделируемой системы.
2. Ограничение в использовании ресурсов на получение исходной информации посредством проведения технологических или других экспериментов. Необходимые ресурсы пропорциональны числу проводимых экспериментов.*N*.

Методами разрешения этих противоречий может быть последовательная многофакторная схема формирования математических моделей. В зависимости от объема необходимой априорной информации и возможности получения планов экспериментов с требуемыми свойствами и параметрами могут быть использованы многофакторные регулярные планы, последовательные квази-*D*-оптимальные планы экспериментов и ЛП_τ р.р. последовательности. Каждый из классов планов экспериментов характеризуется определенными положительными свойствами и недостатками. Выбор того или иного класса планов требует анализа фактических условий получения математических моделей.

Краткие выводы по главе 4.

1. Схема полного факторного эксперимента позволяет сформировать многофакторную математическую модель с наилучшими свойствами. Однако ограничения на необходимые ресурсы для получения исходных данных не позволяют в общем случае использовать полный факторный эксперимент, поэтому необходимо проведение дробного факторного эксперимента.
2. Предложены два основных условия формирования "наилучшего" уравнения регрессии: необходимое — ортогональность или слабая закоррелированность эффектов, входящих в математическую модель, друг к другу; достаточное — статистическая значимость (или значимость по сравнению с не введенными коэффициентами) коэффициентов модели.
3. Постулирование структуры математической модели не гарантирует ее адекватности полученным результатам эксперимента. Решение противоречия между отсутствием необходимой полезной информации относительно структурной сложности искомой модели и ограничением ресурсов для ее поиска необходимо реализовать в последовательном расширении структуры математической модели и последовательной схеме проведения экспериментального исследования.
4. Последовательная схема формирования многофакторной математической модели в условиях неполноты необходимой полезной информации для принятия решения и ограничения ресурсов для получения исходной информации требует расположения точек плана эксперимента в многофакторном пространстве таким образом, чтобы обеспечить максимум полезной информации относительно структуры получаемой математической

модели и свойств ее коэффициентов при ограничении затрат на получение исходной информации.

5. Многофакторные регулярные планы экспериментов позволяют сформировать структуру модели практически произвольной сложности. Их следует использовать, если известна (приближенно) информация о сложности влияния факторов на моделируемый критерий качества технологической системы.
6. При отсутствии подходящего (по числу уровней факторов и опытов) многофакторного регулярного плана необходимо синтезировать последовательный квази- D -оптимальный план эксперимента.
7. Планирование эксперимента на основе ЛПГ р.р. последовательностей целесообразно при отсутствии информации о структуре синтезируемой математической модели; значительном числе факторов ($k = 20-50$ при $N = 64-128$). Они позволяют наилучшим образом выявить структуру многофакторной математической модели и попутно решить задачу многокритериальной оптимизации.

Глава 5 Устойчивое оценивание коэффициентов многофакторного уравнения регрессии в условиях мультиколлинеарности факторов

В разделе 3.4 были рассмотрены принципы получения линейных относительно факторов полиномиальных математических моделей. Было показано, что при использовании метода наименьших квадратов получение линейной математической модели относительно факторов X_j сводится к представлению вектора результатов технологических экспериментов $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_N$ в виде линейной комбинации главных эффектов и их взаимодействий.

Устойчивое оценивание коэффициентов многофакторного уравнения регрессии возможно при ортогональной или близкой к ней системе базисных функций. Если по каким-либо причинам система базисных функций далека от ортогональной, то при наличии в векторе результатов технологических экспериментов неизбежных погрешностей и ошибок при проведении вычислений задача становится некорректной, а полученное решение — неустойчивым.

Отсутствие ортогональности обычно наблюдается для группы эффектов при оценивании коэффициентов уравнения регрессии. Если система базисных функций, т.е. система эффектов, близка к линейно зависимой, то такая система называется мультиколлинеарной. Мультиколлинеарность означает сопряженность эффектов. Термин "сопряженность" используется вместо "коррелируемость" с тем, чтобы подчеркнуть детерминированность эффектов. Термин "коллинеарность векторов" означает векторы, лежащие на одной прямой или на параллельных прямых, и передает смысл строгой линейной зависимости. Обычно точной линейной зависимости не наблюдается, но имеется приближенная зависимость.

Значения главных эффектов и образованных из них взаимодействий,отягощенные погрешностями в случае мультиколлинеарности факторов, становятся стохастически зависимыми. Концепция "точности" классической математики, выражающаяся в том, что и исходные данные, и проведенные с ними вычисления не имеют каких-либо ошибок, в этих типичных условиях не может быть использована, так как "теоретические вычисления, как правило, нельзя реализовать в точном виде" [241, с. 41]. В прикладных исследованиях возникает проблема практической реализации в алгоритмическом, программном обеспечении и на ЭВМ приближенных вычислений, которые бы численно несущественно отличались от теоретических и, следовательно, качественно совпадали бы с ними.

Отсутствие априорной информации о технологической системе не позволяет сформулировать теоретически единственную структуру искомой многофакторной математической модели. Необходимо использовать аппарат линейной алгебры для поиска линейной относительно параметров полиноми-

альной математической модели. При использовании дробного факторного эксперимента возникает линейная зависимость эффектов.

Хотя вопросы линейной зависимости векторов в рамках теоретического рассмотрения исследованы достаточно полно, в прикладных решениях задач они приводят к значительным трудностям, так как приближенное задание исходных условий и приближенные вычисления с ними могут привести линейно независимую систему к зависимой и наоборот.

Основным решением рассматриваемой проблемы является поиск такого преобразования мультиколлинеарности факторов, которое позволяет получить устойчивое оценивание коэффициентов многофакторного уравнения регрессии.

5.1 Мультиколлинеарность факторов при решении типичных технологических задач. Проблема мультиколлинеарности факторов в множественном регрессионном анализе

Традиционные области факторного пространства, в пределах которых изменяются значения факторов, обычно представляются в виде многомерного параллелепипеда. В нем факторы изменяются на отрезках $X_{imin} \leq X_i \leq X_{imax}$ (рис. 5.1). Факторы задаются также на многомерной сфере, с изменением значений $(\sum_{i=1}^k X_i^2) \leq \rho$, ρ — радиус сферы (рис. 5.2) и на симплексе

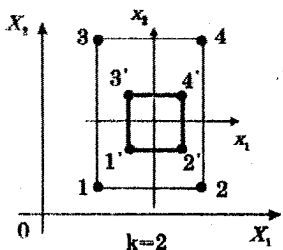
с ограничением $\sum_{i=1}^k X_i = const$ (рис. 5.3). В кодированных значениях независимых переменных планирование таких экспериментов осуществляется на

единичном кубе ($-1 \leq x_i \leq 1$), сфере ($(\sum_{i=1}^k x_i^2)^{1/2} \leq 1$) и регулярном единич-

ном симплексе ($\sum_{i=1}^k x_i = 1, 0 \leq x_i \leq 1$).

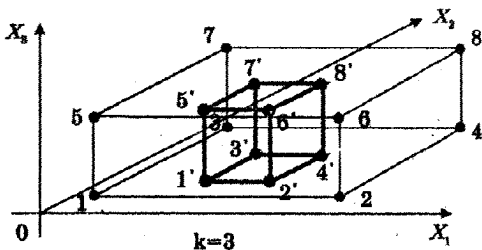
Для указанных областей факторного пространства разработаны многочисленные планы экспериментов, соответствующие различным критериям. Используя такие планы экспериментов, можно получать многофакторные математические модели, соответствующие необходимым критериям качества.

Во многих актуальных в теоретическом и прикладном отношениях задачах, в частности, по технологическим и техническим системам и объектам факторы закоррелированы между собой, и факторное пространство не соответствует стандартному — кубу, сфере, симплексу. Закоррелированность факторов следует из закона корреляции параметров однородного ряда технических объектов [242, с. 338].



$$X_{j/min} \leq X_j \leq X_{j/max};$$

$$-1 \leq x_j \leq 1$$

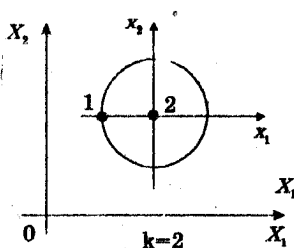


$$X_{j0} = (X_{j/min} + X_{j/max}) / 2,$$

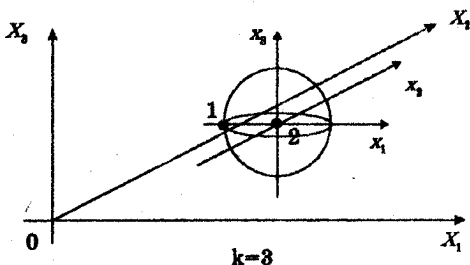
$$\Delta X_j = (X_{j/max} - X_{j/min}) / 2,$$

$$x_j = (X_j - X_{j0}) / \Delta X_j,$$

Рис. 5.1. Планирование на кубе

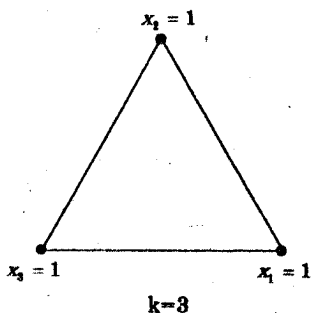


$$\left(\sum_{i=1}^k X_i^2\right)^{1/2} \leq \rho; \quad X_{j/min} \leq X_j \leq X_{j/max}.$$

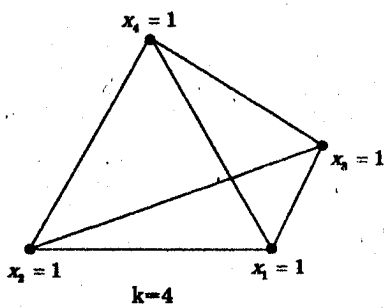


$$\left(\sum_{i=1}^k x_i^2\right)^{1/2} \leq 1; \quad -1 \leq x_j \leq 1.$$

Рис. 5.2. Планирование на сфере



$$\sum_{i=1}^k X_i = const; \quad 0 \leq X_i \leq X_{i/max}.$$



$$\sum_{i=1}^k x_i = 1, \quad 0 \leq x_i \leq 1.$$

Рис. 5.3. Планирование на симплексе

Гипотеза о законе, предложенная д.т.н. проф. А.И. Половинкиным, имеет следующую формулировку: однородный ряд технических объектов S_1, S_2, \dots, S_k , имеющих одинаковые функцию и техническое решение, описываемое набором параметров x, y_1, \dots, y_m и отличающихся значениями главного параметра x_j , связан между собой отношениями $y_i = a_i x_j + b_j$ ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k$).

Значительно ранее проф. А.И. Сидоров в весьма интересной и важной работе "Основные принципы проектирования и конструирования машин" отмечал, что "все зависимости между размерами (конечно, с известными, но весьма незначительными округлениями и отступлениями) оказываются линейными зависимостями; все размеры выражаются почти точно как функции первой степени от главного размера" [47, с. 386].

Пропорциональность размеров деталей машин от некоторых основных (задающих) параметров является фундаментальным свойством для ряда подобных машин. Эта зависимость отмечалась немецким конструктором Реденбахером в 50-х годах прошлого столетия.

Римский архитектор и инженер Марк Витрувий (Vitruvius) Поллионом, работавший 2000 лет тому назад, описал катапульту по относительным размерам.

Немецкие исследователи в области обработки металлов резанием отмечают, что фактическая область факторного пространства рабочих режимов технических и технологических систем во многих важных исследовательских задачах существенно отличается от стандартных [243, с. 46].

Произвольные области факторного пространства, в которых необходимо проводить многофакторные исследования, и зависимость некоторых факторов от основного (определяющего) фактора создают закоррелированность факторов.

На проблему мультиколлинеарности факторов в множественном регрессионном анализе обращают внимание все специалисты. Мультиколлинеарность является причиной понижения точности оценки коэффициентов уравнения регрессии, искажения оценок их дисперсий и ковариаций между ними, искажения дисперсии остатков. С возрастанием закоррелированности факторов вычисленные коэффициенты теряют прикладной смысл в попытке их интерпретации, так как их среднеквадратичные ошибки существенно возрастают, а сами коэффициенты становятся очень чувствительными к выборочным наблюдениям, и незначительное изменение исходных данных "может привести к очень сильным сдвигам в значениях оценок" [244, с. 215].

Общее определение количества информации (по Л. Бриллюэну) связано с отношением площади (в общем случае объема) P_0 , в котором может содержаться интересующая нас информация, к площади (объему) P_1 , в котором она фактически содержится (рис. 5.4). Если, изменяя фактор X ($0 < X < a$), мы моделируем критерий качества технологической системы y ($0 < y < b$), и с надежностью $\beta = 1 - \alpha$ истинная зависимость $\hat{y} = f(x)$

заклучена в области P_1 , то количество информации $I = k \ln P_0/P_1$ [165, с. 43–46].

Так как $P_0 = ab = const$, то увеличить количество информации I можно, уменьшая доверительную область (при определенной надежности $\beta = const$ и дисперсии воспроизводимости $s_y^2 = const$). При проведении многофакторного эксперимента один из основных приемов уменьшения доверительной области (в общем случае минимизации объема эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов модели), а, следовательно, увеличения количества информации заключается в минимизации определителя матрицы дисперсий-ковариаций, т. е. в соответствии плана эксперимента критерию D -оптимальности.

Д.ф.-м.н. Е.З. Демиденко, специалист в области линейной и нелинейной регрессии, делает вывод, что "мультиколлинеарность — одно из основных препятствий эффективного применения аппарата регрессионного анализа" [245, с. 186].

Взаимная сопряженность факторов и их эффектов приводит к изменению истинной картины влияния факторов на моделируемые критерии качества технологической системы. Обсуждая возможности используемого подхода при получении математических моделей в условиях мультиколлинеарности факторов, Р.В. Хемминг, Е.З. Демиденко и другие специалисты приходят к выводу о поиске таких условий проведения многофакторных экспериментов или получения системы нормальных уравнений метода наименьших квадратов, в которых система эффектов будет ортогональной или близкой к ней [240, с. 360; 245, с. 95].

Глубинный смысл последствий мультиколлинеарности факторов связан с неполной вырожденностью факторного пространства, которое в наилучшем исходном состоянии для устойчивости вычисленных коэффициентов математических моделей и интерпретации в прикладных целях должно быть представлено в виде ортогонального базиса или близкого к нему.

Теоретическое представление n -мерного пространства R требует лишь линейной независимости базиса из n векторов, не накладывая более никаких условий [209, с. 65–67]. Желательность ортогонального базиса следует из концепции реальной технологической действительности и прикладной интерпретации получаемых результатов в виде стохастических многофакторных математических моделей.

Если факторное пространство не может быть представлено в виде ортогонального базиса, то необходимо преобразовать неортогональный базис в ортогональный или выбрать такую систему координат, в которой факторы и их эффекты будут представлены ортогонально или близко к этому.

5.2 Принципы создания структур данных с устойчивыми свойствами оценок коэффициентов многофакторного уравнения регрессии из исходных некорректных условий (алгоритм RASTA)

Векторы будут максимально независимы, если они будут перпендикулярны. Обобщение и расширение понятия перпендикулярности векторов отображено в определении ортогональности элементов векторного пространства. Ортогональность обобщает понятие перпендикулярности на любые векторные пространства, в которых определено скалярное произведение. Векторы будут ортогональны, если их скалярное произведение равно нулю.

$$(x_{iu}^{(p)}, x_{ju}^{(p)}) = \sum_{u=1}^N x_{iu}^{(p)} \times x_{ju}^{(p)} = 0, \quad 1 \leq i \leq j \leq k.$$

Попарно ортогональные векторы эффектов образуют диагональную матрицу дисперсий-ковариаций. Такая матрица при условии нормирования ее

столбцов $\sum_{u=1}^N [x_{iu}^{(p)}]^2 = N$ характеризуется тем, что она максимально невыро-

ждена, а ее столбцы — максимально независимы друг от друга. При вычислении коэффициентов модели с использованием матрицы дисперсий-ковариаций с вышеприведенными свойствами увеличение исходных ошибок результатов опытов не происходит, т.е. используются наилучшие условия.

Специалисты считают, что минимизация определителя информационной матрицы и поиск D -оптимальных планов экспериментов "является очень сложной задачей для произвольных функций... не только в теории экстремальных задач, но и вообще в математике" [211, с. 65–66].

Поиск необходимых алгоритмов актуален и труден. Кроме использования чисто математического подхода он требует и новых идей на уровне эвристических решений. Такими решениями может быть алгоритм RASTA.

5.2.1 *Отображение области прообраза планирования эксперимента в область образа математического моделирования*

Формализация задания произвольной области факторного пространства в случае закоррелированности факторов может быть проведена путем задания граничных точек в факторном пространстве и граничных поверхностей, проходящих через эти точки. В зависимости от сложности задания произвольной области граничные поверхности могут быть различной сложности.

На рис. 5.5 и 5.6 показаны произвольные области факторного пространства, ограниченные поверхностями первого и второго порядков, для

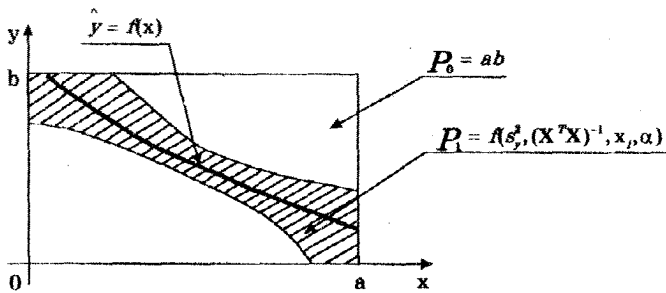


Рис. 5.4. Схема определения количества информации для уравнения регрессии $\hat{y} = f(x)$.

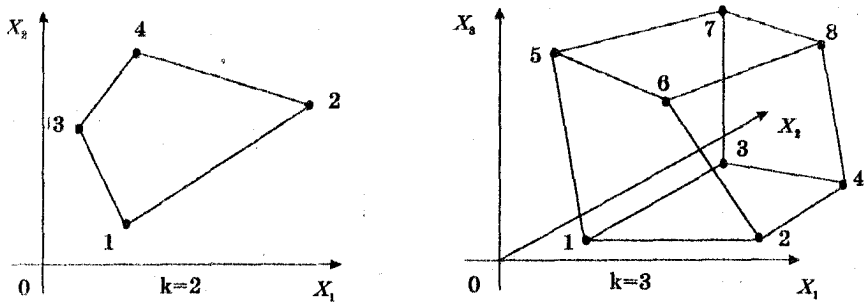


Рис. 5.5 Формализованное представление областей факторного пространства для $k = 2, 3$, ограниченных поверхностями первого порядка

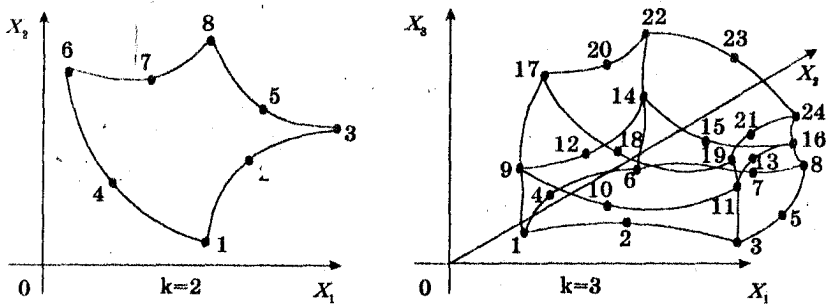


Рис. 5.6. Формализованное представление областей факторного пространства для $k = 2, 3$, ограниченных поверхностями второго порядка

числа факторов $k = 2; 3$. Положение граничных точек $1, \dots, 4; 1, \dots, 8; 1, \dots, 24$ произвольное. Задание произвольной области факторного пространства граничными поверхностями второго порядка практически достаточно для решения многих прикладных задач. Задание областей других видов рассмотрено в п. 5.2.3.

Создание устойчивых методов получения математических моделей для произвольной области факторного пространства можно реализовать на основе идеи отображения области прообраза планирования эксперимента в область образа математического моделирования.

На рис. 5.7 показаны типичные области образа математического моделирования и прообраза планирования эксперимента для граничных поверхностей второго порядка и $k = 2$. Идея отображения одной области в другую основывается на одном из основных понятий топологии — гомеоморфном отображении. Два топологических пространства называются гомеоморфными, если существует взаимно однозначное непрерывное отображение одного из них на другое, для которого обратное отображение тоже непрерывно. Само отображение называется гомеоморфизмом.

Прикладной алгоритм отображения указанных областей сводится к следующим действиям.

Шаг 1. Определяем координаты области прообраза планирования эксперимента, в качестве которого выбираем прямоугольник (параллелепипед). В качестве координаты точек $1_{пр}, 2_{пр}, 3_{пр}$, по оси $X_{1пр}$ примем среднее значение координат точек $1_0, 2_0, 3_0$ по оси X_1 (рис. 5.7). Аналогично найдем координаты точек $4_{пр}, 5_{пр}, 6_{пр}$ и $7_{пр}, 8_{пр}, 9_{пр}$. Таким же образом определяем координату точек $1_{пр}, 4_{пр}, 7_{пр}$ по оси $X_{2пр}$ и координаты точек $2_{пр}, 5_{пр}, 8_{пр}$ и $3_{пр}, 6_{пр}, 9_{пр}$.

Шаг 2. Получаем систему математических моделей, связывающих образ математического моделирования с прообразом планирования эксперимента, т.е. аппроксимируем с заданной точностью отображения в виде функций

$$\begin{cases} X_1 = f_{1пр}(X_{1пр}, X_{2пр}), \\ X_2 = f_{2пр}(X_{1пр}, X_{2пр}). \end{cases} \quad (5.1)$$

Математические модели получаем по схеме полного факторного эксперимента $3^2//9$, что гарантирует точное отображение заданных точек прообраза планирования эксперимента в область образа математического моделирования. В случае обоснованной необходимости более точного отображения для области факторного пространства можно увеличить число точек и перейти к планам $4^2//16$ или $5^2//25$.

В случае необходимости точного отображения определенных точек факторного пространства из одной области в другую их необходимо ввести

в множество исходных точек, по которым будут получены математические модели (5.1).

Общий вид математических моделей для отображения областей и плана эксперимента $3^2/9$

$$X_i = b_{0i} + b_{1i}x_{1np} + b_{2i}x_{2np} + b_{3i}z_{1np} + b_{4i}z_{2np} + b_{5i}x_{1np}x_{2np} + b_{6i}x_{1np}z_{2np} + b_{7i}z_{1np}x_{2np} + b_{8i}z_{1np}z_{2np}; \quad i=1, 2,$$

где x_{1np} , x_{2np} , z_{1np} , z_{2np} — контрасты соответственно первого и второго порядков факторов X_{1np} , X_{2np} .

Вычисляем все коэффициенты математических моделей.

Шаг 3. По равномерному регулярному плану $3^2/9$ для прообраза плана эксперимента определяем математическую модель

$$\hat{y} = f_{np}(X_{1np}, X_{2np}). \quad (5.2)$$

Свойства модели (5.2) соответствуют всем свойствам моделей, полученных по схеме полного факторного эксперимента. Следовательно, коэффициенты модели (5.2) будут максимально устойчивы и $cond = 1$.

Шаг 4. Задаем значения факторов X_1 и X_2 и, используя систему уравнений (5.1), численными методами находим значения X_{1np} и X_{2np} для области прообраза планирования эксперимента.

Шаг 5. По математической модели (5.2) получаем всевозможную информацию о значении моделируемого критерия качества технологической системы y .

Прикладной алгоритм изложен в наиболее общем виде. Если произвольная область факторного пространства будет ограничена поверхностями первого порядка, то в качестве планов экспериментов следует использовать планы 2^2 и 2^3 . В этих случаях значения X_{1np} и X_{2np} можно определить путем решения системы уравнений (5.1).

Практика проведения работ по отображению области прообраза планирования эксперимента в область образа математического моделирования показала, что при выполнении необходимых вычислений накопленные вычислительные погрешности могут быть существенными и могут свести на нет решение поставленной задачи. Поэтому при получении всех моделей необходимо использовать систему ортогональных полиномов Чебышева, а вычисления проводить с двойной точностью.

По указанной причине не следует стремиться без соответствующей необходимости к более сложному заданию границ образа математического моделирования.

5.2.2 Планирование эксперимента с фиктивными факторами (фрагмент PRELE)

В разделе 2.4 было показано, что кроме реальных (физических) факторов в условиях проведения сложного модельного эксперимента могут использоваться фиктивные, т.е. формальные, не имеющие физического смысла независимые переменные величины.

Необходимость использования фиктивных факторов возникает тогда, когда исходные реальные условия, описываемые группой факторов, невозможно представить в виде известного стандартного способа, вытекающего из теории планирования эксперимента и задаваемого известными оптимальными планами многофакторного эксперимента. Типичной причиной таких исходных условий является мультиколлинеарность факторов.

Обычно закоррелированность факторов проявляется между задающим условия фактором (основным) и другими закоррелированными с ним факторами. Основной фактор обозначим (без потери общности) X_1 ; закоррелированный с ним — X_i ; фиктивный — X_{ϕ} . Тогда значения уровней варьирования s_j для фактора X_j выразим как

$$X_{is_j} = f_i(X_{1s_1}, X_{\phi s_{\phi}}). \quad (5.3)$$

Значения уровней X_{1s_1} и $X_{\phi s_{\phi}}$ позволяют проводить с ними планируемый эксперимент, а со значениями уровней фактора X_{is_j} его проводить невозможно. Уровни X_{is_j} используют в качестве физических значений для фактора X_i при проведении технологического эксперимента. В матрице плана эксперимента и при обработке (вычисление коэффициентов модели) результатов эксперимента используют уровни факторов $X_{\phi s_{\phi}}$.

Выражение (5.3) — алгебраическое, точное. Оно позволяет представить значения уровней X_{is_j} в виде двух значений X_{1s_1} и $X_{\phi s_{\phi}}$. Количество уровней $s_j = s_1 \times s_{\phi}$, т.е. больше, чем в отдельности у факторов X_1 и X_{ϕ} . На них не накладываются ограничения, кроме взаимно однозначного соответствия между одноименными значениями уровней X_{is_j} и совместно уровней $X_{1s_1}, X_{\phi s_{\phi}}$.

Рассмотрим реализацию фрагмента PRELE алгоритма RASTA на примере математического моделирования и оптимизации конструктивных и технологических факторов, влияющих на прочность болтовых соединений из композиционных материалов типа углепластиков ("Композит — 2") [246, ч. 1, с. 10–44; ч. 6, с. 47–77].

Объект исследования — конструкции и технология изготовления болтовых соединений деталей из углепластика и металла для киля летательного аппарата.

Цель исследования — изучение влияния конструкторских и технологических факторов на прочность болтовых соединений при растяжении, направленном вдоль оси заготовки, анализ результатов, моделирование объекта исследования, разработка рекомендаций для производства и оптимизации конструкции болтовых соединений по критерию максимальной удельной прочности.

Всего исследовалось влияние 10 факторов. План эксперимента $3^1 \times 4^7 \times 7^1 \times 8^1 // 64$ включал основной фактор — номинальное значение диаметра болта $X_2(d) = 6; 8; 10; 12$ (мм) и два закоррелированных с ним фактора: толщина пластин болтового соединения с усилением $X_1(\delta_c)$ (мм) и количество прослоек усиления, распределенных равномерно по всей толщине пластины, $X_7(n)$ (шт).

На рис. 5.8 показана область совместного существования факторов $X_2(d)$ и $X_1(\delta_c)$, а на рис. 5.9 — факторов $X_2(d)$ и $X_7(n)$. Анализ областей показывает, что с увеличением диаметра болтов (фактор $X_2(d)$) значения толщины пластины болтового соединения с усилением $X_1(\delta_c)$ и количество прослоек усиления, распределенных равномерно по всей толщине пластины, $X_7(n)$ увеличиваются пропорционально:

$$r(X_2(d), X_1(\delta_c)) = 0,6141,$$

$$r(X_2(d), X_7(n)) = 0,4804.$$

В качестве уровней фиктивного фактора примем $X_{1\phi} = -1; 0; 1$, а для фактора $X_{7\phi} = 0; 1; 2; 3$. Составим таблицы сочетаний факторов $X_2(d); X_{1\phi} \rightarrow X_1(\delta_c)$ и факторов $X_2(d); X_{7\phi} \rightarrow X_7(n)$. По полученным таблицам определяем необходимые зависимости:

$$X_1(\delta_c) = X_2(d) + [2 + (1/6) X_2(d)] X_{1\phi},$$

$$X_7(n) = 2 + [(X_2(d))/2 - 2] X_{7\phi}.$$

Для факторов $X_2(d), X_{1\phi}$ и $X_2(d), X_{7\phi}$ коэффициенты парной корреляции равны нулю.

Рабочая матрица для проведения вычислений с использованием фиктивных значений факторов $X_{1\phi}, X_{7\phi}$ приведена в [246, ч. 6, с. 72, табл. 3.6].

Модификация указанного подхода была также использована в оптимизации технологических условий сварки полиэтиленовых труб [247, с. 29–31].

Рассмотренный подход позволяет существенно расширить области использования теории планирования эксперимента и получать устойчивые значения коэффициентов математических моделей в условиях мультиколлинеарности факторов.

5.2.3 Использование оптимальных координат факторного пространства

В решениях большинства задач математического моделирования технологических систем машиностроения используется ортогональная система

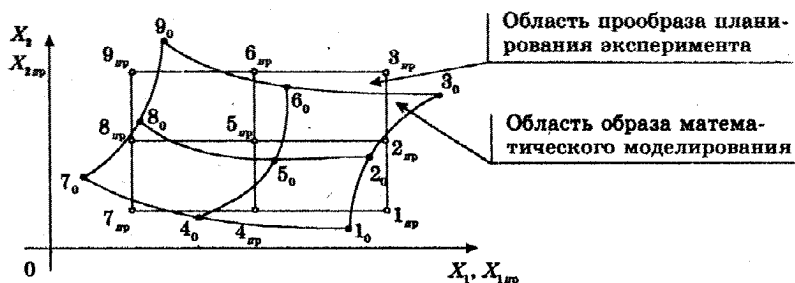


Рис. 5.7. Схема отображения области прообраза планирования эксперимента в область образа математического моделирования

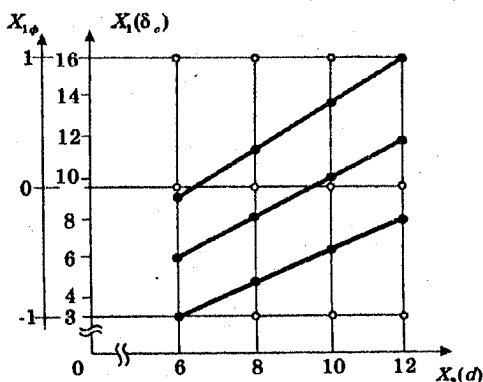


Рис. 5.8. Область совместного существования факторов $X_2(d)$, $X_1(\delta_c)$ и $X_2(d)$, $X_{1\phi}$

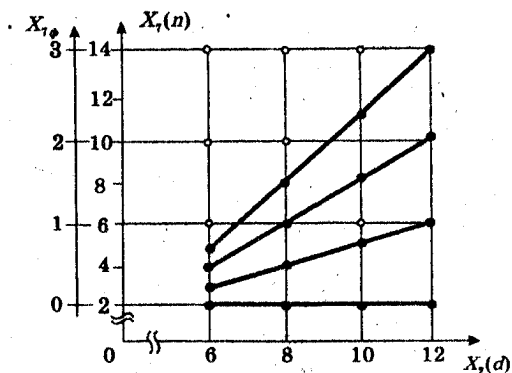


Рис. 5.9. Область совместного существования факторов $X_2(d)$, $X_1(n)$ и $X_2(d)$, $X_{1\phi}$

координат факторного пространства. В качестве линий, определяющих положение произвольной точки, которая показывает значения координат факторов в этой системе координат, используют отрезки прямых линий. Как известно, уравнениями таких линий будут модели первого порядка.

Возможности устойчивого оценивания коэффициентов математических моделей в случае мультиколлинеарности факторов можно принципиально расширить, если вместо отрезков прямых линий для определения координат произвольной точки в многофакторном пространстве использовать семейство кривых линий. Оно будет образовывать произвольную систему координат факторного пространства.

Рассмотрим в n -мерном пространстве R^n область Φ , в которой определено совместное существование факторов X_1, X_2, \dots, X_k (рис. 5.10). Пусть в области Φ определены k гладких функций точки $x_{iкр}(P)$ ($1 \leq i \leq k$) таких, что в области Φ каждая координатная поверхность семейства $x_{iкр}(P) = const$ пересекается с каждой координатной поверхностью семейства $x_{jкр}(P) = const$ ($1 \leq i < j \leq k$) по координатной линии. k чисел ($x_{1кр}, x_{2кр}, \dots, x_{kкр}$) однозначно определяют точку P в области R^n и их называют координатами в системе криволинейных координат $x_{1кр}, x_{2кр}, \dots, x_{kкр}$. Семейство линий $x_{iкр}(P) = const; \dots; x_{kкр}(P) = const$ называется координатными линиями и покрывает область Φ координатной сеткой, в общем случае криволинейной (см. рис. 5.10).

Система криволинейных координат может быть основной и использоваться самостоятельно как первичная. В тех случаях, когда она не может быть основной, ее можно использовать как вторичную. Тогда первоначальной (основной) системой координат факторов рассматриваемой предметной области в подавляющем большинстве случаев будет прямоугольная система координат. Необходимо обеспечить переход от прямоугольной системы координат к криволинейной и наоборот. Переход из основной системы координат факторов в криволинейную систему и обратно (рис. 5.6) можно осуществлять методами, описанными в п. 5.2.1. Можно ожидать, что наиболее используемыми будут криволинейные координаты: полярные, сферические, цилиндрические, а также параболические, эллиптические и др.

На простейших примерах из пространства размерности $k=2$ рассмотрим, почему криволинейная система координат может обеспечить преимущества по сравнению с традиционной ортогональной системой.

В некоторых технических системах (например, турбохолодильниках) с использованием газов и жидкостей применяются спиралеобразные (на основе спирали Архимеда) камеры. Схема такой камеры в плане показана на рис. 5.11 а. Если сделать одну из стенок экспериментальной камеры прозрачной и использовать голографические средства проведения наблюдений и бесконтактных замеров параметров среды (скорости потока, температуры, давления) в такой камере, то можно поставить задачу математического моделирования указанных функций в зависимости от исходных факторов —

давления, температуры — в различных интересующих нас точках камеры. Каким образом наиболее "естественно" и просто задать в многофакторном плане эксперимента различные точки в рассматриваемой спиралеобразной камере?

Задание экспериментальных точек в ортогональной системе координат, помимо неудобства интерпретации, не позволяет получить ортогональные свойства коэффициентов модели, которые описывают пространство камеры. Переход к полярной системе координат с использованием в качестве факторов радиуса-вектора r и угла поворота φ позволяет формализовать положение произвольной точки внутри и на границах канала и представить в плане эксперимента эти точки по схеме полного факторного эксперимента или в виде многофакторного регулярного плана. Тем самым обеспечиваются наилучшие информационные свойства получаемых моделей.

Другим примером может быть формализация произвольной области факторного пространства, представленной в виде четырехвершинника с использованием метода проективной геометрии (см. рис. 5.116). В качестве первоначальной (основной) системы координат используется ортогональная система. В ней задаются координаты точек $O_1(X_{11}, X_{21})$, $O_2(X_{12}, X_{22})$. Точки 1, 2, ..., 9, принадлежащие четырехвершиннику, задаются двумя пучками прямых, проходящими через точки O_1 и O_2 . Положение каждой точки четырехвершинника определяется пересечением соответствующих прямых, расположенных под углами φ_1 и φ_2 .

На рис. 5.116 показана схема полного факторного эксперимента $3^2/9$ (для точек, принадлежащих четырехвершиннику). В качестве фиктивных факторов используются значения углов φ_1 , φ_2 , а в качестве констант для определения точек, принадлежащих четырехвершиннику, — координаты точек $O_1(X_{11}, X_{21})$ и $O_2(X_{12}, X_{22})$.

При сближении точек O_1 и O_2 закоррелированность факторов X_1 и X_2 для указанного семейства точек в ортогональной системе координат $O X_1 X_2$ стремится к единице. Однако коэффициенты математической модели, определенные для области четырехвершинника с использованием метода проективной геометрии, остаются максимально устойчивыми, так как сохраняется схема полного факторного эксперимента $3^2/9$.

В случае высокой закоррелированности факторов X_1 и X_2 требования к точному поддержанию фактических значений указанных факторов по матрице плана эксперимента в технологических экспериментах и точности проведения вычислений возрастают. Невыполнение этих требований сводит на нет возможности правильного оценивания коэффициентов получаемых математических моделей.

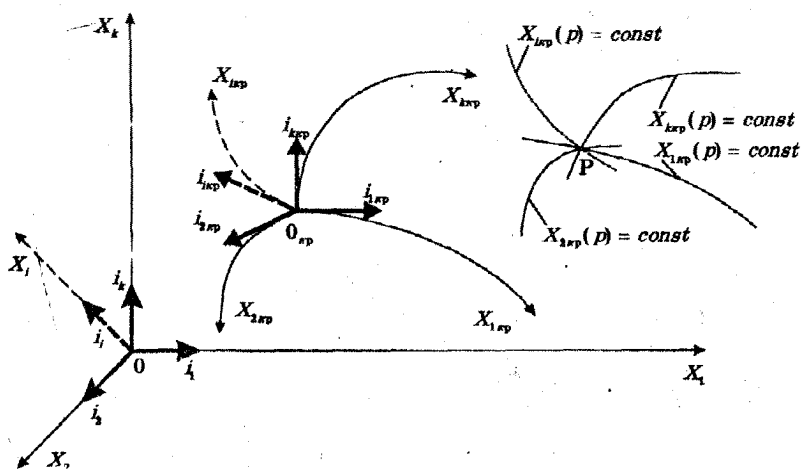
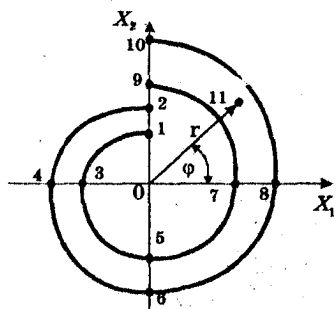
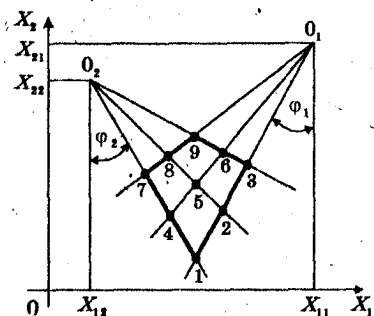


рис. 5.10. Система криволинейных координат многомерного факторного пространства



k=2

а)



k=2

б)

Рис. 5.11. Планирование эксперимента с использованием а) полярной системы координат и б) метода проективной геометрии

5.3 Типичные классы задач, решаемые с использованием алгоритма RASTA

С использованием алгоритма RASTA можно решать следующие типичные классы задач.

1. Задачи, в которых параметры (факторы) однородного ряда технологических (технических) объектов связаны линейной зависимостью.

На рис. 5.12 показана область совместного существования факторов X_1 и X_2 , каждый из которых задан на отрезке $X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max}$. Сочетания значений факторов в нижнем левом и верхнем правом треугольниках по технологическим причинам невозможны (например, сочетание минимальных или максимальных скоростей и подач при токарной обработке материалов резанием). При произвольной (не обязательно прямолинейной) области совместного существования факторов они будут закоррелированы и для этой области $r(X_1, X_2) \neq 0$.

2. Обработка результатов активного эксперимента при условии, что уровни факторов не могут быть заданы достаточно точно по матрице плана эксперимента (рис. 5.13).

Необходимо провести замеры фактических значений уровней факторов в эксперименте и обработать результаты с полученными значениями факторов. Тогда предложенная матрица плана эксперимента не будет соответствовать фактическим результатам.

Следует отобразить область прообраза планирования эксперимента в область образа математического моделирования.

Рассматриваемый класс задач возникает при проведении высокоточных (прецизионных) экспериментов; проведении эксперимента в условиях неоднородностей; с плохо управляемыми или неуправляемыми факторами.

3. Обработка результатов пассивного (специально не организованного) эксперимента (рис. 5.14).

Для фактора $X_{i\text{пас}}$, уровни которого не могут соответствовать плану эксперимента, используются фиктивные факторы $X_{i\text{ф}}$. Значения уровней фактора $X_{i\text{пас}}$ отображаются в плане эксперимента значениями уровней факторов $X_{i1\text{ф}}$, $X_{i2\text{ф}}$. Связь между значениями факторов задается моделью $X_{i\text{пас}} = f_i(X_{i1\text{ф}}, X_{i2\text{ф}})$.

Уровни для факторов $X_{i1\text{ф}}$, $X_{i2\text{ф}}$ выбирают из значений уровней m -го факторного регулярного плана, а уровни $X_{i\text{пас}}$ задаются значениями по рабочей матрице плана эксперимента. Между уровнями факторов $X_{i\text{пас}}$ и $X_{i1\text{ф}}$, $X_{i2\text{ф}}$ устанавливается взаимно однозначное соответствие по одноименным строкам указанных планов экспериментов. Связь между произвольными значениями уровней указанных факторов (в пределах областей их существования) задается полученной моделью.

Практическое решение указанных классов задач и принимаемых при этом действий кроме выполнения приведенных рекомендаций требует определенного опыта и принятия неформальных решений.

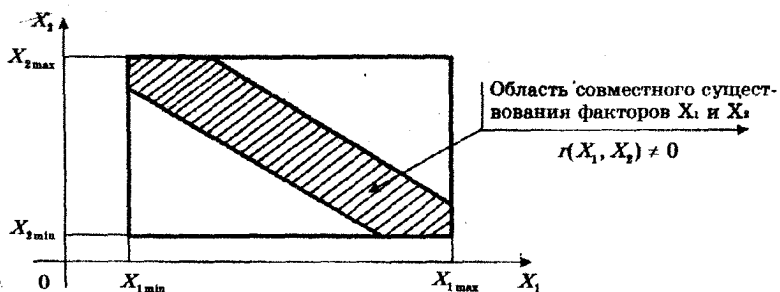


Рис. 5.12. Область совместного существования для факторов X_1 и X_2

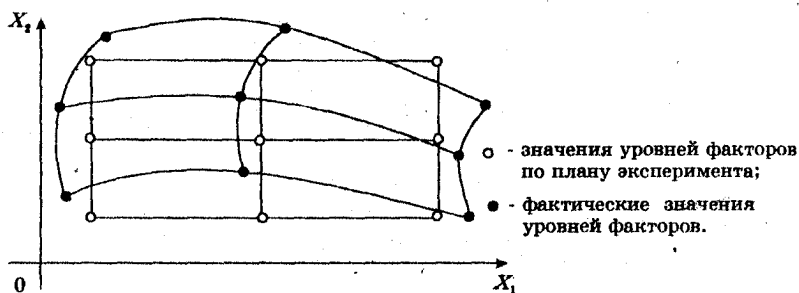


Рис. 5.13. Области планирования эксперимента для номинальных и фактических значений уровней варьирования факторов X_1 и X_2

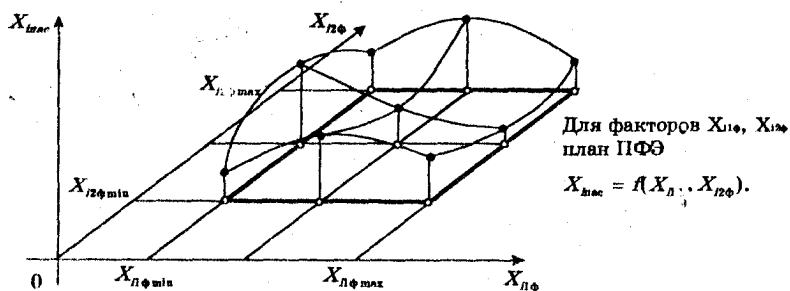


Рис. 5.14. Схема планирования эксперимента для обработки пассивного эксперимента

5.4 Исследование информационных свойств многофакторных уравнений регрессии, полученных из исходных некорректных условий

Рассмотренные в пп. 5.2.1 – 5.2.3 различные модификации алгоритма RASTA позволяют получить устойчивые оценки коэффициентов многофакторного уравнения регрессии в условиях, когда факторы закоррелированы. Все предложенные подходы (кроме использования произвольных координат факторного пространства как основных) приводят к получению устойчивых коэффициентов уравнения регрессии не в основных значениях факторов X_1, \dots, X_k , а в других, которые являются их сложными функциями.

По указанной причине интерпретация полученных коэффициентов многофакторных уравнений регрессии в терминах главных эффектов и взаимодействий факторов, отнесенных к основным факторам X_1, \dots, X_k , не представляется возможной. Эти модели можно использовать как интерполяционные для вычисления (прогноза) моделируемых технологических критериев качества.

При получении математических моделей, отображающих область образа планирования эксперимента в область образа математического моделирования, опорные точки одной области отображаются в соответствующие точки другой области точно. Точность отображения произвольных точек одной области в другую зависит от точности, которую обеспечивают полученные математические модели.

Для повышения точности отображения произвольных точек из одной области в другую необходимо увеличить сложность указанных моделей путем увеличения числа опорных точек и, следовательно, сложности структуры получаемых математических моделей для отображения областей. Необходимо реализовать оптимальную сложность для отображения одной области в другую. С целью повышения точности отображения и упрощения математических моделей желательно область образа математического моделирования ограничивать поверхностями первого порядка.

5.5 Основные выводы

Одним из основных условий успешного получения математических моделей реальных технологических систем по результатам проведенных экспериментов является конструирование таких многофакторных экспериментов, алгоритма выбора структуры и оценки значений коэффициентов моделей, которые обеспечивали бы устойчивый выбор как самих наименований коэффициентов, так и их оценку (вычисление).

Необходим правильный выбор систем допущений для применения математического аппарата к реальной технологической действительности. Выбранные допущения должны соответствовать сущности прикладной задачи.

Однако точное выполнение предпосылок в действительности не реально. Обеспечение устойчивости получаемого решения к сравнительно малым отклонениям от принятых допущений необходимо, чтобы полученное решение имело прикладной реальный смысл.

Многообразие реальных постановок технологических задач может также включать невыполнение весьма важных предпосылок. В настоящей главе рассмотрены причины мультиколлинеарности факторов в технологических системах и предложены алгоритмы устойчивой оценки коэффициентов многофакторного уравнения регрессии.

Сформулируем краткие выводы по главе 5.

1. Устойчивая оценка коэффициентов многофакторного уравнения регрессии в классическом регрессионном анализе обеспечивается независимостью (статистической и физической) эффектов. В реальных технологических и технических системах факторы не могут быть полностью ортогональны. Причины взаимной закоррелированности факторов следует видеть в том, что соответствие систем сочетанию наилучших критериев качества — оптимальности — накладывает между факторами определенные зависимости, которые приближенно выражаются линейными моделями.

2. Взаимная сопряженность факторов и эффектов приводит к изменению истинной картины их влияния на моделируемые критерии качества, увеличению ошибок определяемых коэффициентов уравнения регрессии. Глубинный смысл последствий мультиколлинеарности факторов связан с неполной вырожденностью факторного пространства, в котором не возможны независимые оценки эффектов и, следовательно, наиболее точное их определение. С увеличением закоррелированности факторов, что проистекает из прикладных системных причин, решение задачи становится невозможным.

3. Впервые предложены принципы создания структур данных с устойчивыми свойствами оценок коэффициентов многофакторного уравнения регрессии из исходных некорректных условий (алгоритм RASTA, три модификации). Использование алгоритма RASTA позволяет решить задачи, в которых факторы однородного ряда технологических (технических) объектов связаны линейной зависимостью; обработать результаты активного эксперимента при условии, что уровни факторов не могут быть заданы достаточно точно по матрице плана эксперимента, а также результаты пассивного (специально не организованного) эксперимента.

4. Интерпретация полученных устойчивых многофакторных уравнений регрессии в терминах главных эффектов и взаимодействий факторов, выраженных через основные факторы X_1, \dots, X_k не представляется возможной, поскольку эти эффекты являются сложными функциями нескольких (2-х, 3-х) различных основных факторов. Полученные модели можно использовать как интерполяционные для вычисления (прогноза) моделируемых технологических критериев качества.

5. Решение триединой (т.е. в системной постановке) задачи: оптимальное планирование эксперимента, устойчивая оценка коэффициентов математической модели и успешная интерпретация полученных результатов будут иметь наилучший итог, если в соответствии со спецификой решаемой прикладной задачи правильно выбрана система координат факторного пространства, с использованием которой может быть реализован оптимальный план эксперимента. В противном случае решающий задачу должен быть незаурядным специалистом и использовать свои незаурядные способности для того, чтобы можно было достичь незаурядных результатов.

Глава 6 Выполнение предпосылок регрессионного анализа и проблема формирования критериев качества многофакторного уравнения регрессии

При познании реальной действительности (в наших случаях технологических систем и процессов) с применением методов формализованного описания выбранной предметной области мы используем и общие принципы логического вывода, сложившиеся в теоретической математике при работе с математическими объектами (математическими структурами). Они заключаются в выборе системы предпосылок относительно некоторых свойств рассматриваемых технологических систем, использовании теоретического аппарата логического вывода и его проведении, формулировке полученных следствий (результатов).

Все исследователи, использующие математические методы в прикладных исследованиях, приходят к единому выводу об определяющем значении принятых предпосылок относительно свойств изучаемых реальных систем или объектов. Эффективность процесса познания зависит от совершенства системы предпосылок и ее выполнения в реальной действительности.

Принятая исследователем система предпосылок формирует свойства математических объектов, их "близость" к изучаемой реальной действительности, удобство и эффективность работы с ними и, тем самым, обеспечивает полезность полученных математических результатов, их возможность быть используемыми в предметной технологической реальности.

Реализация выбора предпосылок и начальных условий, осуществляемая чисто в математическом подходе и для решения прикладной задачи, может принципиально различаться по поставленным целям и фактическим достигнутым результатам. Известный французский физик Л. Бриллюэн, рассматривая задание начальных условий при решении реальной задачи, отмечает, что "... снова здесь математикам удастся уклониться от правильного ответа. Они говорят о заданных начальных условиях, как будто о второстепенном деле. Однако дело обстоит совсем иначе!... подчеркнем, что начальные условия никогда не задаются (если не считать задач на экзаменах). Они проистекают из тщательного исследования прошлого всей системы" [165, с. 96]. И далее Л. Бриллюэн снова возвращается к этой важной проблеме. "Начальные условия нельзя считать "заданными": их нужно измерять и наблюдать" [165, с. 187].

Д.ф.-м.н. Е.С. Вентцель (И. Грекова) также считает исключительно важным вопрос о величинах, которые в математических моделях считаются заданными [248, с. 111].

Принятые предпосылки многофакторного регрессионного анализа формулируют обоснованность полученных результатов и свойств моделей, обеспечивают решение абстрактной или реальной задачи, и в конечном счете создают научную и прикладную полезность решения.

Особенностью широко используемого при получении моделей метода наименьших квадратов является его неустойчивость, "если не делать каких-то дополнительных предположений, которые трудно проверяемы" [208, с. 94]. Поэтому при решении прикладной задачи необходимо не только сформулировать, по мнению исследователя, систему необходимых предпосылок, но и методики их проверок; устойчивость предпосылок и метода получения моделей к сравнительно малым нарушениям принятых условий; систему действий исследователя, если принятые предпосылки не выполняются фактически.

Необходимо также сформулировать систему критериев качества многофакторного уравнения регрессии; использовать и разработать алгоритмическое и программное обеспечение для получения многофакторных математических моделей поточным методом; добиться, чтобы программное обеспечение могли использовать не специалисты в области прикладной статистики, программирования, теории планирования эксперимента, например, инженеры-технологи, конструкторы, аспиранты и студенты машиностроительных специальностей.

6.1 Система предпосылок регрессионного анализа и ее выполнение при проведении прикладных исследований

Применение многофакторного регрессионного анализа для получения стохастических математических моделей прикладных технологических систем основано на ряде предпосылок. Число таких предпосылок колеблется от 3 до 9. Наиболее часто формулируют 5–7 предпосылок. Принято считать многофакторный регрессионный анализ стандартным (классическим), если предположения выполняются.

Выполнение принятых предпосылок необходимо для того, чтобы свойства полученных математических моделей были известны и научно обоснованы. Фактически предположения могут не выполняться. Поэтому желательно сформулировать действия предварительного характера для "блокирования" отрицательных следствий невыполнения предпосылок. При изложении данного раздела будем придерживаться работ [131, 249].

Предпосылка 1. Значения критерия качества (иначе отклика) y_{ul} – случайные независимые результаты, образующие выборку из генеральной совокупности.

$$\varepsilon_{ul} = y_{ul} - M(y_{ul});$$

$$M(\varepsilon_{ul}) = 0; \quad M(\varepsilon_{ul}^2) = \sigma^2(\varepsilon); \quad M(\varepsilon_{ul}, \varepsilon_{ul'}) = 0, \quad l \neq l'.$$

Случайный характер наблюдаемых результатов не вызывает каких-либо сомнений. Однако научный смысл в данной интерпретации этого понятия связан с существованием устойчивых вероятностей для этих случайных величин и, следовательно, определенного известного исследователю закона

распределения этой случайной величины. Нередко исследователь не знает и не может узнать (ввиду значительной трудности экспериментальных наблюдений) вид закона распределения. Случайная величина может относиться к индетерминированным (адаптивным) величинам, для которых не существует традиционного понимания закона распределения [131, с. 5–8].

Ослабить "негативные" следствия в таких ситуациях возможно, если разбить план эксперимента на ортогональные блоки и пытаться провести эксперимент в каждом блоке за сравнительно короткие интервалы времени, в возможно "меньших" объемах пространства. Дисперсия воспроизводимости результатов экспериментов будет существенно уменьшена и, тем самым, будет уменьшена неопределенность, создаваемая неизвестными исследователю свойствами случайной составляющей исходных данных ε_{ij} .

Наблюдаемая случайная погрешность должна иметь нулевое математическое ожидание. В противном случае необходимо попытаться узнать ее величину и учесть как отклонение от нулевого (центрированного) значения.

Классическая теория обычно предполагает, что случайные ошибки результатов наблюдений статистически независимы, т.е. некоррелированы. Исследования и наблюдения, проведенные д.т.н. П.Е. Эльясбергом, показали, что ошибки результатов наблюдений ε_{ij} , $\varepsilon_{i'l}$ закоррелированы между собой [80, с. 69–73, 89–91]. При наличии в результатах наблюдений даже слабой закоррелированности ошибок $|r(\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{i'l})| = 0,01–0,1$, которую практически весьма трудно установить, оценка по методу наименьших квадратов оказывается неэффективной (не наилучшей по точности). В этих условиях увеличение числа наблюдений (за счет повторных наблюдений) ухудшает точность оценки отыскиваемого параметра [80, с. 101].

Необходимо разбить план эксперимента на ортогональные блоки и каждый блок экспериментов провести за минимально возможный промежуток времени в максимально возможных однородных условиях для неуправляемых и неконтролируемых факторов. Желательно, чтобы число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости результатов наблюдений было приблизительно равным 20–70 (меньшее значение для большей закоррелированности ошибок).

Предпосылка 2. Дисперсия ε_{ij} должна быть постоянной величиной или должна иметь известную функциональную зависимость от значений факторов.

$$D(\varepsilon_{ij}) = \sigma^2(\varepsilon) = \text{const.} \quad D(\varepsilon_{ij}) = \sigma^2(\varepsilon) h(x_1, \dots, x_k).$$

Постоянство дисперсий для различных строк матрицы плана эксперимента (при наличии повторных опытов) следует проверить по критерию Кохрена G . При этом необходимо выполнить условие постоянства числа повторных опытов для каждой строки рабочей матрицы, т.е. $n_{ij} = n = \text{const.}$

Если дисперсии не однородны, необходимо преобразовать (например, логарифмировать) результаты наблюдений, что делает дисперсии однородными. Если не преобразовывать результаты наблюдений, то необходимо ис-

пользовать обобщенный метод наименьших квадратов, а в случае диагональной матрицы ошибок — взвешенный метод наименьших квадратов.

Предпосылка 3. Значения критерия качества y_{ij} при определенных значениях факторов должны подчиняться нормальному закону распределения.

С учетом предпосылки 1 $\varepsilon_{ij} = N(0; \sigma^2(\varepsilon))$.

Соответствие распределения исходных данных нормальному закону важно в теоретическом смысле, т. к. коэффициенты регрессионной модели совпадают в этом случае с оценками метода максимума правдоподобия и характеризуются многими оптимальными свойствами.

Метод наименьших квадратов можно использовать для поиска оценок коэффициентов многофакторного уравнения регрессии, если ошибки ε_{ij} не распределены нормально. Однако, в этом случае использование многих важных в статистике распределений (χ^2 , t , F) для анализа результатов экспериментов и соответствующих критериев не обосновано, т.к. исходное распределение случайной величины ε_{ij} должно подчиняться нормальному закону.

Проверку гипотезы о нормальном распределении можно провести с помощью ω_{ij} -критерия [131, с. 47]. Этот критерий при ограничении на число повторных опытов является более мощным, чем χ^2 -критерий Пирсона.

При нарушении предпосылки необходимо преобразовать результаты наблюдений и получить распределение исходных данных "ближе" к нормальному.

Если отклонения от нормального закона существенны, то эффективность оценок коэффициентов моделей уменьшается (при длинных хвостах распределения). Коэффициенты становятся чувствительными к грубым ошибкам в хвостах распределений.

Разработаны многие методы устойчивого оценивания коэффициентов моделей в виде M -, L -, R -оценок [202, с. 200–220]. Они эффективны для различных распределений и малочувствительны (устойчивы) к возможным грубым ошибкам в результатах наблюдений.

Предпосылка 4. Уровни факторов X_1, \dots, X_k в различных опытах одного эксперимента суть детерминированные (неслучайные) величины. Желательно, чтобы фактические ошибки уровней факторов X_1, \dots, X_k были достаточно малы и ими можно было бы пренебречь в сравнении с ошибками в значении y_{ij} .

При нарушении предположения необходимо использовать план эксперимента наименее чувствительный к ошибкам уровней факторов. Такими планами могут быть многофакторные регулярные планы робастные к выбору структуры математических моделей. Для указанных планов коэффициент, трансформирующий (передающий) относительные погрешности значений факторов в относительные погрешности значений откликов (критериев качества технологических систем), суть число обусловленности μ (раздел 3.6).

Именно выбор такого плана с робастными свойствами обеспечивает минимальные значения μ .

Если ошибки факторов существенны, то необходимо использовать разработанный алгоритм RASTA (раздел 5.3, пункт 2).

Предпосылка 5. Управляемые факторы X_1, \dots, X_k независимы относительно друг друга в физическом и статистическом смысле

$$r(X_i, X_j) = 0; \quad 1 \leq i \leq j \leq k.$$

Хотя всегда говорится о независимости факторов, необходимо и правильно обеспечить независимость всех эффектов — главных эффектов факторов и взаимодействий факторов.

Фактическое обеспечение указанной предпосылки является одной из основных проблем многофакторного регрессионного анализа. Ранее были рассмотрены основные причины возникновения закоррелированности эффектов: переход в большинстве случаев от схемы полного факторного эксперимента к дробному факторному эксперименту (раздел 4.1); закон корреляции параметров однородного ряда технических объектов (раздел 5.1) и задание произвольной области существования факторов, которая характеризуется закоррелированностью эффектов (подраздел 5.2.1). Многочисленные рекомендации по выбору устойчивой структуры многофакторного уравнения регрессии в случае дробного факторного эксперимента и разработанные три класса последовательных дробных факторных экспериментов приведены в главе 4.

В главе 5 приведен алгоритм RASTA и его модификации для устойчивого оценивания коэффициентов многофакторного уравнения регрессии в условиях мультиколлинеарности факторов.

Указанные разработки позволяют получить хорошие результаты в ситуациях, когда предпосылка 5 нарушается.

Предпосылка 6. На вектор значений b_0, b_1, \dots, b_k не накладываются ограничения.

Значения коэффициентов многофакторного уравнения регрессии обычно априорно в технологических исследованиях не известны. Поэтому это предположение не вызывает возражений в технологической практике.

Наиболее типичные линейные ограничения на коэффициенты, некоторые свойства и оценивание коэффициентов рассмотрены в [202, с. 81–85; 245, с. 89–92].

Предпосылка 7. Число определяемых коэффициентов многофакторного уравнения регрессии k' должно быть меньше или равно числу независимых между собой опытов плана эксперимента N .

Данная предпосылка формализованно сводится к тому, что ранг (наивысший порядок отличного от нуля минора) расширенной матрицы X всех определяемых эффектов k' должен быть меньше или равен числу независимых между собой опытов плана эксперимента N .

$$\text{rank}(X) = k' \leq N.$$

Выполнение предпосылки необходимо для возможности нахождения коэффициентов многофакторного уравнения регрессии.

Отметим две особенности, связанные с рассматриваемой предпосылкой. При выполнении предпосылки ($k' \leq M$) среди столбцов матрицы не должно быть линейной или близкой к ней зависимости. Общее число эффектов, которые должны быть проанализированы для введения в математическую модель, исходя из анализа схемы полного факторного эксперимента, обычно превышает число независимых опытов $N < M_{\Pi}$. Однако практика решения многих прикладных задач показала, что общее число статистически значимых эффектов обычно не превышает 20–35. Формирование структуры уравнения регрессии рассмотрено в разделе 4.4.

Предпосылка 8. Структурная группа коэффициентов многофакторного уравнения регрессии не задана.

В классическом регрессионном анализе структура модели считается известной (или заданной) до начала проведения экспериментов. В прикладных исследованиях весьма редко можно доказательно постулировать структуру математической модели в виде многофакторного уравнения регрессии до начала проведения экспериментов.

Типичной формулировкой при постулировании структуры многофакторной математической модели является следующая. "Предполагается, что переменные y, x_1, x_2, \dots, x_n связаны однородной линейной зависимостью

$$y = \sum_{j=1}^n a_j x_j.$$
 Коэффициенты a_j неизвестны. Для их определения эксперимен-

тально находятся значения $y_r = \sum_{j=1}^n a_j x_{jr}, \quad r = 1, 2, \dots, N$ " [250, с. 57].

Классическая математика не смогла формализовать выбор структуры математической модели в типичной ситуации решения конкретной многофакторной прикладной задачи. Отмечается "...принципиальное отличие неформализуемой задачи выбора вида искомой математической модели исследуемого явления и чисто формальной задачи нахождения по экспериментальным данным значений параметров уже выбранной аппроксимирующей функции" [228, с. 277]. Альтернативой к классическому подходу постулирования структуры многофакторной модели может быть сквозная автоматизированная технология выбора структуры (раздел 4.4) с использованием программного средства "Планирование, регрессия и анализ моделей" [251, с. 24–26].

Предпосылка 9. В прикладных задачах математического моделирования сложных систем число различных опытов N сверху весьма ограничено: обычно $N \leq 32-64$.

В математических и прикладных технологических работах по многофакторному регрессионному анализу эта предпосылка обычно не приводится и не обсуждается. В теоретическом плане ограничение на число опытов про-

сто не существует. В прикладных системных исследованиях особенно с возрастанием сложности проводимых технологических экспериментов жесткое ограничение на число опытов неизбежно. В этом проявляется принципиальное различие теоретического и прикладного подходов в многофакторном регрессионном анализе.

Ограничение сверху на число возможных опытов формирует уровень коррелированности эффектов между собой, особенно, если число факторов в проводимом эксперименте значительно. Это делает многофакторный регрессионный анализ неэффективным и даже невозможным с позиций его использования в прикладных исследованиях: получить значительный объем формализованной информации в виде многофакторных математических моделей по малому объему исходной экспериментальной информации объективно невозможно.

Для преодоления этого противоречия необходимо сначала оптимизировать технологическую систему и ее моделирование проводить только с изменяющимися в технологическом процессе факторами, а не со всеми первоначальными. Уменьшить общее число факторов в модельном эксперименте можно также перейдя к сложным факторам, каждый из которых отражает влияние двух и более физических (простых) факторов.

Второй подход был использован при математическом моделировании термонапряженной электроизоляции технологического модуля [232, с. 40–45; 252], где девять независимых физических факторов удалось свести к четырем сложным: X_1 – электрофизический; X_2 – геометрический; X_3 – фактор теплоотдачи; X_4 – теплофизический. Для четырех сложных факторов был использован план эксперимента $3^4/27$. Его эффективность – 100 %. Все полученные девять моделей были устойчивы. Для четырех моделей $cond=1$. Другие модели имели $cond = 2,39–9,64$.

Предпосылка 10. Между любыми двумя заданными соседними экспериментальными значениями поверхность уравнения регрессии должна наименее уклоняться от нуля.

При аппроксимации исходных данных информация об истинных значениях поверхности отклика в промежуточных точках отсутствует. Принятие рассматриваемой предпосылки ограничивает значительные изменения поверхности отклика между заданными точками в многомерном пространстве. Для более точной аппроксимации необходимо увеличить число уровней по каждому фактору.

Так как число опытов в прикладных исследованиях ограничено, то при выполнении обоих требований необходимо использовать в качестве плана эксперимента ЛП_T р.р. последовательности (рекомендации приведены в разделе 4.7).

С использованием полиномиальной структуры многофакторного уравнения регрессии в общем случае данная предпосылка не выполняется. Отметим, что в рассматриваемой технологии получения математических моделей

и разработанном программном обеспечении (ПС ПРИАМ) используется в качестве системы базисных функций система ортогональных полиномов Чебышева, и данная предпосылка выполняется.

Предпосылка 11. Множество результатов (как следствий проведенных с технологической системой экспериментов) не должно образовывать несвязные (например, C -, S -образные или амебообразные) распределения точек исходной совокупности.

Совокупность исходных данных может быть такова, что искомую математическую модель нельзя представить в виде одной функции регрессии. Если удовлетворительная модель "не получается" (о чем свидетельствуют ее критерии качества), то необходимо использовать таксономические методы для получения информации о свойствах распределения многомерной случайной величины. Они позволяют разбить совокупность данных на непустые и непересекающиеся подмножества и установить, допустимо ли считать, что след и спектр совокупности точек-объектов отвечают эллипсоидальному распределению или же распределению точек совокупности, которое можно назвать несвязным [253, с. 15–19].

Выявление несвязных распределений в многомерном случае исследовано еще мало. Поэтому желательно использовать априорную информацию о возможности получения исходных данных в виде несвязных совокупностей.

Могут быть сформулированы и другие предпосылки регрессионного анализа.

Рассмотрев систему формальных требований для применения регрессионного анализа, их выполнение при проведении системных прикладных исследований, отметим следующее.

Помимо выполнения формальных предпосылок (математических требований) необходим содержательный анализ данных, вытекающий из содержательной постановки задачи.

Разработчики системы анализа данных на ЭВМ СИТО пришли к выводу, что "...анализ данных проходит на двух уровнях — содержательном и формальном, причем определяющим является первый. Поэтому грош цена тем "точным" формальным результатам, которые не подкреплены достоверностью исходных содержательных посылок и содержательным осмыслением полученных цифр и графиков" [254, с. 169].

Исследователь, решающий прикладную задачу, должен помимо математических знаний успешно применять и содержательное прикладное понимание достижения поставленной цели.

6.2 Проблема прикладного статистического анализа многофакторного уравнения регрессии для линейной относительно параметров математической модели

Существо рассмотренных в предыдущем разделе многочисленных предпосылок регрессионного анализа характеризуется значительным их количеством, трудностью проверки некоторых из них, неопределенностью структурной группы коэффициентов многофакторного уравнения регрессии до начала проведения эксперимента, случайным характером моделируемых значений откликов, закоррелированностью (в случае дробного факторного эксперимента) эффектов между собой, ограничением на число возможных линейно независимых экспериментов, возможной несвязностью распределения точек исходной совокупности результатов экспериментов и другими важными свойствами моделируемой предметной системы.

К ним следует добавить: многомерность факторного пространства, в котором предельно затруднено наглядное представление проводимых геометрических операций получения математической модели; вычислительные ошибки, сопровождающие проведение вычислений; ограничения по памяти и быстродействию (аппаратные ограничения) существующей вычислительной техники; различное возможное алгоритмическое и программное обеспечение проводимых действий, вычислений и другие особенности.

Получение многофакторных математических моделей сложных систем методом аппроксимации исходных данных (результатов) функционирования этой системы не может безоговорочно гарантировать высокое качество решения прикладной задачи. Так как достижение поставленной цели необходимо и не может быть заменено на объяснение ее невыполнимости, а плохое качество решения не позволит эффективно решить технологическую задачу, то необходимо оценить качество решения, степень его совершенства.

Оценка качества решения должна быть комплексной (системной), интерпретируемой для целей использования модели, количественной, выполнимой. Перечислим наиболее важные критерии качества, которые необходимо проверить и оценить после начального и окончательного формирования многофакторной математической модели.

1. Получение информативного подмножества главных эффектов и взаимодействий факторов из исходного множества эффектов схемы, полного факторного эксперимента для принятия в качестве структуры искомой многофакторной математической модели.
2. Обеспечение максимально высокой теоретической эффективности (вплоть до 100 %) извлечения полезной информации из исходных данных за счет формирования D -оптимального (или квази- D -оптимального) плана эксперимента робастного (устойчивого) к выбору произвольной структуры многофакторной математической модели.

3. Проверка на статистическую значимость потенциальной математической модели.
4. Проверка предпосылок о свойствах случайных ошибок, входящих в результаты экспериментов: постоянство дисперсии воспроизводимости результатов экспериментов, нормальный закон распределения ошибок и другие.
5. Проверка на адекватность (соответствие, правильность) полученной модели произвольным результатам экспериментов в пределах принятых изменений факторов.
6. Проверка на информативность, т. е. присутствие в математической модели полезной информации и ее статистической значимости в сравнении с уровнем случайных, неинформативных составляющих.
7. Проверка на устойчивость коэффициентов математической модели к случайным составляющим в исходной информации.
8. Проверка фактической эффективности извлечения полезной информации из исходных данных.
9. Оценка семантической (информационной) по полученным коэффициентам математической модели.
10. Проверка свойств остатков $e_{ul} = y_{ul} - \hat{y}_u$.
11. Общая оценка свойств полученной математической модели и возможности ее использования для достижения поставленной цели.

Итоговый вывод о целесообразности использования математических моделей имеет неформальный характер и может быть сделан специалистом (или специалистами), хорошо понимающими как результаты формальных (статистических) проверок, так и те прикладные цели, для достижения которых должны быть использованы полученные модели.

6.3 Установление информативного подмножества главных эффектов и взаимодействий факторов

Для успешного использования математических моделей в прикладных целях необходимо, чтобы их коэффициенты несли полезную смысловую (семантическую) информацию о влиянии моделируемых факторов на критерии качества технологических систем. В этом заключается прикладной смысл информативности подмножества коэффициентов математической модели.

В работах по многофакторному регрессионному анализу приведенная цель получения модели обычно не ставится и не обсуждается ввиду неясности подходов и значительной сложности их реализации. Модель обычно рассматривается как средство, позволяющее вычислить и тем самым прогнозировать значения критерия качества технологической системы, а не устано-

вить с ее использованием смысловую связь влияния факторов технологической системы на критерий качества.

Настоящая постановка задачи позволяет использовать полученную математическую модель для объяснения механизмов происходящих явлений в технологической системе [255, с. 60–63].

Учитывая, что методом получения моделей является аппроксимация исходных данных и структура моделей в общем случае исследователю не известна, наиболее приемлемым подходом для выбора класса аппроксимируемых моделей будет линейная модель относительно независимых параметров. Полученная модель будет наиболее приемлемой в целях ее прикладной интерпретации, если ее коэффициенты будут ортогональны друг относительно друга или близки к ортогональным. Ранее (раздел 4.1) было показано, что для получения моделей с указанными свойствами необходимо использовать регулярные факторные планы, систему ортогональных полиномов Чебышева и систему последовательного формирования структуры математической модели (раздел 4.4.) с выбором робастного к формированию структуры модели плана эксперимента.

Будем считать, что гипотетическая математическая модель $y = f(X_1, \dots, X_k)$ представляется относительно определенной точки $M_0 = X_0(X_{10}, \dots, X_{k0})$ в многомерном факторном пространстве полиномиальной математической моделью, линейной относительно независимых параметров. Тогда коэффициенты математической модели

$$\hat{y} = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2^2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1x_3^2$$

могут быть интерпретированы в прикладной области следующим образом:

$$dy/dx_1 \approx b_1; \quad d^2y/dx_2^2 \approx b_2; \quad d^2y/dx_1dx_2 \approx b_3; \quad d^3y/dx_1dx_3^2 \approx b_4$$

в точке $M_0 = X_0$.

В точке M_0

$$\hat{y}_0 = b_0 + b_1x_{10} + b_2x_{20}^2 + b_3x_{10}x_{20} + b_4x_{10}x_{30}^2.$$

В произвольной точке факторного пространства M_1 и в пределах изменения факторов в плане эксперимента интерпретация коэффициентов становится ясной из следующей зависимости

$$\hat{y}_0 = b_0 + b_1(x_{11} - x_{10}) + b_2(x_{21} - x_{20})^2 + b_3(x_{11} - x_{10})(x_{21} - x_{20}) + \\ + b_4(x_{11} - x_{10})(x_{31} - x_{30})^2 = b_0 + \hat{y}_1 + \hat{y}_2 + \hat{y}_3 + \hat{y}_4.$$

Отметим, что ортогональность коэффициентов математической модели или их близость к этому свойству позволяет по их абсолютной величине и знаку судить о силе и направлении влияния соответствующего эффекта. Такие коэффициенты можно округлять независимо друг от друга в пределах их доверительных интервалов. Если же коэффициенты закоррелированы друг с другом, то недостоверные цифры коэффициентов нельзя отбрасывать

[189, с. 499], так как потеря точности может быть весьма существенной, и проведение вычислений по модели не будет иметь смысла.

6.4 Устойчивость (корректность) структуры математической модели и значений оценок коэффициентов

Прикладные цели использования математических моделей определяют требование устойчивости как структуры, так и значений оценок коэффициентов математической модели.

Под устойчивостью (корректностью) структуры математической модели будем понимать неизменность совокупности наименований (спецификации) эффектов многофакторной математической модели, линейной относительно параметров, к случайным изменениям значений отклика, порождаемыми ошибками результатов наблюдений, вычислений и неопределенностью искомой структуры.

Здесь проявляется требование единственности решения поставленной задачи в противоположность получению множества решений. Устойчивость структуры получаемых моделей необходима для объективной (правильной) их интерпретации в предметной области исследования и достижения с использованием моделей поставленной цели (целей).

Помимо устойчивости структуры математической модели необходимо обеспечить устойчивость значений оценок ее коэффициентов. Оба вида устойчивости зависят от степени закоррелированности эффектов математической модели друг относительно друга; она и создает мультиколлинеарность эффектов. Поэтому следует рассмотреть способы (иначе меры) измерения мультиколлинеарности.

В многофакторном регрессионном анализе и линейной алгебре обычно используют различные меры, которые численно характеризуют это понятие.

1. Определитель матрицы (информационной Фишера) плана эксперимента X .

$$|X^T X| = \prod_{i=1}^k \lambda_i,$$

где λ_i — характеристическое число.

2. Мера обусловленности матрицы по Нейману-Голдстейну.

$$P(X^T X) = \lambda_{\max} / \lambda_{\min},$$

где λ_{\max} , λ_{\min} — максимальное и минимальное собственное число для информационной матрицы Фишера $X^T X$.

3. Минимальное характеристическое число информационной матрицы Фишера

$$\lambda = \lambda_{\min}(X^T X).$$

4. Максимальная парная сопряженность эффектов, введенных в математическую модель

$$\max_{i,j} |r_{i,j}|, \quad 1 \leq i < j \leq k',$$

где k' — общее число эффектов математической модели.

5. Максимальная сопряженность эффектов x_1, \dots, x_k

$$\max_i |R_i|,$$

где $|R_i|$ — множественный коэффициент корреляции i -го эффекта со всеми другими эффектами, введенными в математическую модель.

6. Число обусловленности матрицы $X^T X$

$$\text{cond}(X^T X) = \|X^T X\| \times \|(X^T X)^{-1}\|$$

Предполагается, что матрица $X^T X$ невырождена.

Анализ предложенных мер мультиколлинеарности показывает, что они с различных позиций характеризуют взаимную сопряженность эффектов математической модели.

Учитывая различный уровень закоррелированности эффектов между собой, различную возможность масштабирования введенных в модель эффектов друг относительно друга, и качественную неоднозначность различных мер при стремлении некоторых из них к 0, 1 или к ∞ (бесконечности), трудно однозначно рекомендовать какую-либо меру в качестве наилучшей. Это — следствие многогранности понятия мультиколлинеарности.

Тем не менее можно рекомендовать меру обусловленности по Нейману-Голдстейну (2 мера) при условии нормирования каждого из эффектов и число обусловленности матрицы $X^T X$ (6 мера). Из рассмотренных мер указанные меры наиболее близки друг к другу. Так как существует вычислительная проблема собственных значений, то вычисление обеих мер и близость их друг относительно друга может характеризовать вычислительные погрешности. Указанные меры были использованы для характеристики устойчивости коэффициентов многофакторных математических моделей в программном средстве "Планирование, регрессия и анализ моделей".

В значительной по объему работе, посвященной алгоритмам и программам восстановления зависимости, под редакцией д.т.н. В.Н. Валника рассматривается проблема формирования структуры модели, которая могла бы дать "...истинное" объяснение наблюдаемых явлений, а оставшиеся невязки или ошибки могли быть признаны случайными" [222, с. 740]. Обращается внимание, что чрезмерное усложнение структуры модели (для определенного объема экспериментального материала) приводит к увеличению дисперсии коэффициентов регрессии. Для анализа конкретных результатов предполагается использовать собственные числа эффектов λ_j . Авторы приходят к выводу, что "при достаточно быстро затухающих (уменьшающихся — Р.С.) числах λ_j помеха усиливается настолько, что может во много раз превзойти полезный сигнал и, как говорят, решение "разваливается" [222, с. 742].

Мера обусловленности матрицы по Нейману-Голдстейну использует не только информацию о λ_{\min} , но и сравнивает ее с λ_{\max} , тем самым получая сравнительную информацию об уровне малости λ_{\min} .

6.5 Проверки математической модели на статистическую значимость, информационную эффективность, адекватность, информативность, устойчивость коэффициентов, эффективность извлечения полезной информации из исходных данных [131; 249]

Специфические особенности получения математических моделей на основе экспериментально-статистического подхода таковы, что каждая полученная математическая модель должна быть охарактеризована группой критериев качества. Критерии качества описывают различные свойства полученной математической модели и их близость к наилучшему или удовлетворительному набору свойств. Теория и практика решения прикладных задач в системной постановке показала необходимость многокритериальной характеристики свойств полученных математических моделей.

Первоначально необходимо провести содержательный логико-профессиональный анализ полученных исходных данных и комплекс предварительных проверок предпосылок многофакторного регрессионного анализа. Они включают: исключение грубых ошибок, систематических погрешностей; проверки нормальности распределения ошибок; проверка однородности опытов (по G - критерию); после получения модели — вычисление доли отрицательных остатков, доли остатков больших среднего, отношения максимального остатка к среднему; проверку на независимость ошибок и некоторые другие проверки. Затем проверяют статистическую гипотезу о целесообразности получения математической модели, которая объяснила бы систематическую изменчивость средних результатов наблюдений в каждом опыте \bar{y}_u из N проведенных относительно общего среднего значения \bar{y} для всех опытов (эту изменчивость следует объяснять за счет влияния моделируемых факторов X_i при условии рандомизации проведения опытов и разбиения плана эксперимента на ортогональные блоки) по сравнению со случайной изменчивостью повторных опытов y_{ul} относительно своих средних значений \bar{y}_u . Проверку можно провести с использованием метода дисперсионного анализа.

$$F_{N-1;N(n-1)}^{\text{эмп}} = \left(\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \bar{y})^2 / (N-1) \right) / \left(\sum_{u=1}^N \sum_{l=1}^n (y_{ul} - \bar{y}_u)^2 / N(n-1) \right).$$

Если $F_{N-1;N(n-1)}^{\text{эмп}} > F_{\alpha;N-1;N(n-1)}^{\text{табл}}$, то получение математической модели целесообразно; в противном случае нецелесообразно, так как суммарное влияние группы факторов X_1, \dots, X_k будет статистически незначимо на фоне случайных ошибок повторных опытов.

Ранее отмечалась целесообразность и необходимость создания таких условий проведения технологических экспериментов, которые обеспечивали бы максимально возможную информационную эффективность (вплоть до 100 %) извлечения полезной информации из исходных $M \times n$ опытов. Под 100 % эффективностью понимают достижение минимально возможной дисперсии для оценки определенного параметра из выборки с фиксированным числом наблюдений. Для оценки теоретической эффективности плана эксперимента предполагается, что структура математической модели соответствует модели главных эффектов. Эффективность для многофакторных равномерных регулярных планов соответствует 100 %. Для неравномерных планов практически во всех реальных ситуациях она выше 83–90 %.

Структура математической модели должна соответствовать "истинной структуре" и отражать семантику влияния факторов на моделируемый отклик. Критерий семантической здесь имеет информационный характер и трактуется как вероятность достижения поставленной цели в математическом моделировании, исходя из правильности задания структурной группы коэффициентов многофакторного уравнения регрессии, линейного относительно независимых параметров. Такая трактовка семантической (информационной) предложена акад. А.А. Харкевичем.

Математические модели должны быть адекватны, т.е. соответствовать исходным результатам экспериментов, которые они аппроксимируют. Адекватность обычно устанавливается проверкой по F -критерию статистической гипотезы о статистической незначимости различия дисперсии адекватности $s_{ад}^2$ и дисперсии воспроизводимости $s_{ош}^2$ результатов экспериментов, по которым были получены коэффициенты математической модели. Получение неадекватной модели не означает, что она не может быть использована для решения поставленной задачи.

Практика математического моделирования показала, что при решении задач существенной размерности (сотни тысяч или миллионы взаимодействий низшего порядка по схеме полного факторного эксперимента) часть информации, не отображенная в математической модели, остается "распределенной" за многими эффектами взаимодействий, и ввиду их малости они не могут быть введены в структуру модели.

В случае неадекватности полученной модели возможность ее использования должна быть выяснена после анализа величины и статистической значимости множественного коэффициента корреляции R . Проверка модели на информативность проводится путем вычисления множественного коэффициента корреляции R и проверки его статистической значимости. Множественный коэффициент корреляции показывает меру линейной зависимости между средними значениями результатов опытов \bar{y}_n и значениями эффектов факторов, действующих в системе, которые выражают эту связь через предсказанные по полученной математической модели значения критериев каче-

ства \hat{y}_u . Статистическая значимость коэффициента множественной корреляции указывает на то, что в полученной математической модели содержится гораздо больше полезной информации, чем в исходных (случайных) данных относительно этой модели.

Проверка статистической значимости множественного коэффициента корреляции R проводят по F -критерию [131, 249]. Если $F_{k-1; Nn-k}^{\text{эксп}} > F_{\alpha; k-1; Nn-k}^{\text{табл}}$, то множественный коэффициент корреляции R формально статистически значим. В противном случае R не значим, и модель не имеет информационной ценности.

Однако незначительное (и в этом смысле формальное) превышение $F^{\text{эксп}}$ по сравнению с $F^{\text{табл}}$ в прикладных целях не может быть достаточным. Существенность такого различия можно установить, используя критерий Бокса и Веца [202, с. 58–60]. В программном средстве ПРИАМ статистическая значимость R проверяется по обоим указанным критериям.

Если $R \rightarrow 1$, то результаты \hat{y}_u , просчитанные по модели, стремятся к средним значениям по опытам \bar{y}_u , т.е. $\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 \rightarrow 0$, независимо от

того, адекватна модель или нет. Если R статистически значим и сравнительно близок к 1, то число различимых градаций отклика \hat{y} в общем интервале его изменения, т.е. $N_R = (y_{\max} - y_{\min}) / \Delta \hat{y}$ ($\Delta \hat{y}$ — зона неопределенности для истинного значения \hat{y}), можно определить по табл. 6.1 [228, с. 251]. Из анализа табл. 6.1 следует, что относительная приведенная погрешность γ результатов \hat{y} уменьшится с 10 % до 1 %, если R увеличится с 0,985 до 0,99983; число различимых градаций увеличится с 5 до 50.

Вернемся к вопросу о возможности использования модели в случае, если она не адекватна. Отметим, что проверки модели на адекватность и значимость R различны, независимы и не взаимозаменяемы. Поэтому использование дополнительной информации по табл. 6.1 может решить вопрос о полезности полученной модели для конкретной цели ее использования.

Коэффициенты математической модели должны быть устойчивы к малым случайным изменениям в исходных данных, полученным в процессе экспериментов. Выполнение этого требования подробно рассматривалось в разделах 3.7, 4.1, 6.4. В разделе 6.4 предложено для количественного показателя устойчивости коэффициентов математической модели использовать 2 меры обусловленности: по Нейману-Голдстейну и число обусловленности матрицы $X^T X$. Число обусловленности для ортогональной нормированной матрицы $X^T X$ равно 1, а для слабо закоррелированных ее столбцов — превышает единицу и из опыта решения многочисленных задач по изложенной методологии обычно не превышает 10.

Таблица 6.1 [228] Использование коэффициента множественной корреляции для оценки качества получаемого решения

Число N_R различимых градаций отклика	Относительная при- веденная погреш- ность γ , %	Коэффициент мно- жественной корре- ляции $R_{\bar{y}_n \hat{y}_n}$
1	50	0,0
2	25	0,9
3	16	0,96
4	12	0,98
6	8	$0,99=1-10^{-2}$
20	2,5	$0,999=1-10^{-3}$
60	0,8	$0,9999=1-10^{-4}$
200	0,25	$0,99999=1-10^{-5}$

В программном средстве ПРИАМ проводилось вычисление обоих показателей, характеризующих устойчивость коэффициентов математических моделей.

Фактическая эффективность \mathcal{E} извлечения полезной информации из исходных данных для схемы дробного факторного эксперимента может быть $\mathcal{E} \leq 100$ %. Степень понижения эффективности зависит от уровня закоррелированности эффектов друг относительно друга и нормировки столбцов эффектов в расширенной матрице X . Нормирование столбцов можно обеспечить всегда. Минимальное снижение эффективности извлечения полезной информации из исходных данных обеспечивается за счет использования многофакторных равномерных регулярных планов экспериментов или близких к ним и предложенных алгоритмов и технологии формирования структуры математических моделей (главы 4, 5).

Косвенным показателем эффективности может быть число обусловленности μ для полученной модели. Если $1 < \mu \leq 10$, то эффективность следует считать хорошей.

6.6 Проблемы создания интеллектуальных программных средств для системной обработки результатов экспериментов

Получение полезной научно обоснованной технологической информации путем обработки результатов экспериментов относится к информационным технологиям. В неразрывной связке "программное обеспечение — компьютер" программное обеспечение является главным инструментом информационной эпохи.

Попытки решить все более сложные научные, технологические и технические задачи, создание искусственного интеллекта привело исследовате-

лей к выводу, что только использование языка математики недостаточно для успеха. По мнению известного математика и кибернетика М. Минского, (Массачусетский технологический институт) языком для принятия интеллектуальных решений должен стать язык интеллектуальных программ [256, с. 3].

Акад. В.С. Пугачев, специалист в области проблем управления, математики, считает, что при создании прикладных методов исследований "широкое внедрение математических методов и ЭВМ во все сферы деятельности возможно только при создании интеллектуального математического обеспечения" [171, с. 26–27].

Д.ф.-м.н. С.А. Айвазян, анализируя программное обеспечение персональных ЭВМ по статистическому анализу данных, отмечает лишь частичное использование возможностей современных ПЭВМ для интеллектуальной составляющей специализированного программного обеспечения (СПО) по прикладной статистике. По его мнению наблюдается "катастрофическое нарастание числа недоброкачественных, а порой просто недобросовестных статистических исследований, авторы которых, не являясь специалистами в области анализа данных, эксплуатируют СПО" [231, с. 94]. С.А. Айвазян приходит к выводу "... о целесообразности, более того — о необходимости существенной интеллектуализации эксплуатируемого и вновь создаваемого программного обеспечения по статистическому анализу данных" [231, с. 95].

Создание специализированного программного обеспечения для статистической обработки результатов экспериментов требует участия высококвалифицированных специалистов по прикладной статистике, вычислительной математике, программированию, так как в численных расчетах всегда имеется бездна ловушек [257, с. 10].

Анализ решекных многофакторных задач по математическому моделированию сложных систем показывает недостаточность формального использования программного обеспечения. Чем сложнее решаемая прикладная задача, тем более определяющим становится профессионализм исследователей, их хорошее понимание содержательной системной постановки задачи, возможностей выбранного метода решения, используемых алгоритмов, программного обеспечения. Важно также правильно выбрать схему проведения вычислений для конкретной решаемой задачи, интерпретировать полученные результаты.

Зарубежные специалисты по статистическим методам и планированию эксперимента в технике и науке Н. Джонсон и Ф. Лион предостерегают от чрезмерного увлечения ЭВМ и формального использования результатов расчетов по исходным статистическим данным без необходимого понимания их сущности [204, с. 500].

Недостаточно просто использовать имеющуюся под рукой программу или пакет прикладных программ для проведения статистических вычислений. Профессор статистики университета в Данди (Шотландия) П. Спрент обращает внимание на необходимость знания особенностей используемых паке-

тов программ и компьютеров, применяемых в статистических исследованиях и особенно в регрессионном анализе, так как "некоторые регрессионные программы с легкостью составляют регрессионное уравнение в тех случаях, когда это в принципе невозможно" [258, с. 230].

Особенно актуальна проблема программного обеспечения в проводимых автоматизированных статистических исследованиях, так как, по мнению некоторых специалистов, автоматизация задач регрессионного анализа зашла в тупик [259, с. 6].

Проблему квалифицированной обработки статистических данных можно решить с использованием различных подходов.

1. Создать интеллектуальные программные средства для системной обработки результатов экспериментов [260].

2. Использовать для решения задач высококвалифицированных специалистов как консультантов или участников решения задач.

Первый подход позволяет частично автоматизировать решение задач, существенно ускорить обработку данных, проводить их не специалистам в области прикладной статистики, программирования.

Второй подход требует при решении каждой задачи участия высококвалифицированного специалиста (или даже нескольких).

Первый подход труднее в реализации, требует комплексных решений в программном продукте и более важный по своим последствиям, так как позволяет решать задачи на потоке.

Второй подход возможен в ограниченных ситуациях; он малопродуктивный, недоступен для многих, решающих задачи.

Будущее за первым подходом. Необходимо учитывать, что программное обеспечение может быть товаром и стоимость пакета программ часто сравнима со стоимостью экспериментальной установки. Проведение вычислительного эксперимента с полученными моделями существенно быстрее и дешевле, чем получение информации на экспериментальной установке. Попыткой создания интеллектуального программного обеспечения следует считать программное средство "Планирование, регрессия и анализ моделей".

6.7 Программное средство "Планирование, регрессия и анализ моделей"

В создании программного обеспечения автор принял участие в 1972–74 гг. В 1971 г. им был составлен алгоритм вычислений при планировании второго порядка. В 1973–74 гг. была создана 2-я модификация алгоритма и разработаны таблицы параметров композиционных рототабельных, ортогональных, квази-*D*-оптимальных и некомпозиционных планов 2-го порядка для числа факторов $k = 2 - 8$.

Разработанный алгоритм вычислений и таблицы параметров позволили вычислять математические модели, проводить полный статистический анализ,

исследовать почти стационарную область для 55 наименований планов экспериментов. На основе указанных алгоритмов была создана программа вычислений (инженер-программист А.К. Пасечник) для ЭВМ "Минск-22". С использованием программы в 1974—81 гг. были рассчитаны более 140 задач. Программа использовалась для выполнения НИР "Разработка и внедрение методики испытаний агрегатов и узлов на основе методов математической теории планирования эксперимента" с Киевским механическим заводом (ныне Авиационный научно-технический комплекс им. О.К. Антонова) [21, ч. 1, ч. 6; 261].

В связи с усложнением решаемых задач автором в 1980 г. была разработана методология использования многофакторных регулярных планов применительно к объему оперативной памяти и быстродействию ЭВМ "Мир-2" [21, ч. 16, ч. 19]. Программа вычисления моделей, статистического анализа была написана ассистентом А.П. Кругляком.

В работах [262, 249] были подробно изложены принципы использования многофакторных регулярных планов в решениях различных технологических и технических задач, методы формирования структуры многофакторных математических моделей; рассмотрены оптимальные условия определения коэффициентов уравнения регрессии; сформулированы методы устойчивого оценивания коэффициентов математических моделей в условиях мультиколлинеарности факторов.

На основе алгоритмов, изложенных в указанных работах, для ЕС ЭВМ н.с. С.Н. Лапачем и группой программистов был написан пакет прикладных программ "Планирование, регрессия и анализ моделей" ППП ПРИАМ [263]. Язык программирования — PL/1. Объем программной части 12000 строк исходного текста. В процессе отладки и эксплуатации пакета были сделаны изменения и дополнения по сравнению с исходными алгоритмами. Значительная часть этой работы была проведена н.с. С.Н. Лапачем.

В 1991 г. для ПЭВМ типа IBM PC была создана версия ППП ПРИАМ (н.с. С.Н. Лапач и в последующих версиях инж. П.Н. Бабич), работающая в интерактивном режиме; операционная система MS DOS, язык написания C [264].

Программное средство "Планирование, регрессия и анализ моделей" предназначено для выполнения комплекса работ, связанных с генерацией многофакторных планов экспериментов для многокритериальной оптимизации и многофакторного математического моделирования, обработки их результатов с использованием прикладной статистики, проведения вычислительного эксперимента, визуализации полученных результатов [265, с. 133—135].

ПС ПРИАМ можно использовать при решении разнообразных научных, прикладных задач с технологическими, техническими, материаловедческими, измерительными и другими системами. Его использование возможно при

решении конструкторских, технологических, испытательных, эксплуатационных задач; в учебном процессе, в научно-исследовательской работе.

По мнению экспертов, ПС ПРИАМ имеет преимущества по сравнению с аналогичными пакетами ПНП БИМ, ВМДР, ППСА, ОТСЕВ по следующим техническим характеристикам [251, с. 24; 266].

1. Реализация специально разработанной технологии решения научных и прикладных задач по построению математических моделей и многокритериальной оптимизации, а не набор стандартных методов и средств прикладной статистики.
2. Ориентация на массового пользователя: ПС содержит все необходимые средства для решения задач от ее постановки до подготовки отчета — обеспечивается получение результатов высокого качества за счет самоадаптирующихся вычислительных схем, настраивающихся на исходные данные и промежуточные результаты. Имеется возможность изменять параметры вычислительных схем и активно вмешиваться в процесс решения задачи на любом этапе;
 - достигается высокая надежность и достоверность конечного результата;
 - контекстная помощь позволяет в любом месте получить необходимую информацию.
3. Робастное (устойчивое) конструирование эксперимента.
4. Эффективные алгоритмы определения структуры уравнения регрессии.
5. Устойчивое оценивание сильно закоррелированных факторов в многофакторном уравнении регрессии.

На Первом конкурсе украинских программных продуктов в 1993 г., организованном СП "ТЕКНОР", ПС ПРИАМ среди более двухсот программных продуктов был удостоен диплома и премии [251, с. 14–16]. ПС ПРИАМ внедрен в 17 организациях Украины и СНГ [267, с. 52–53].

6.8 Основные выводы

Математические понятия и правила вывода формируются согласно аксиоматическому подходу на основе логически формальных понятий. Содержательные понятия технологических систем, представляющие сущность предметной области, не имеют непосредственной связи с математикой.

Связь формальных понятий с реальной действительностью возможна через выполнение многочисленных предпосылок, сформулированных в формальной области, т.е. в математике. Поэтому использование математических методов для формализованного описания реальных технологических систем поставило проблему выполнения принятых предпосылок регрессионного анализа.

Общенаучное и философское понимание соотношения математики и реальной действительности в работах А. Эйнштейна, Дж. фон Неймана, акад. Б.В. Гнеденко и многих других математиков показывает первичность реальной действительности в происхождении математики. Будучи абстрактной не эмпирической наукой, математика тесно связана с реальной действительностью. Однако связь эта имеет непростой и в некоторых важных случаях своеобразный характер: буквальное выполнение математических следствий при приложении математики к реальной действительности не всегда возможно. Наиболее четко и лаконично это положение сформулировал А. Эйнштейн: "Если теоремы математики прилагаются к отражению реального мира, они не точны; они точны до тех пор, пока не ссылаются на действительность ..." [268, с. 83].

При использовании математики для изучения технологических систем не следует забывать, что проявление научного подхода лишь частично является чисто теоретическим. Существенная его часть заключается в использовании метода наблюдений, специально поставленных экспериментов. С возрастанием системности и сложности необходимых наблюдений и экспериментов обеспечение в технологической действительности предпосылок, сформулированных в математической теории, становится трудновыполнимой задачей.

В разделе 6.1. уже указывалось на трудности проверки предпосылки 1 для требования $M(\varepsilon_{ul}, \varepsilon_{ul'}) = 0, l \neq l'$. По заключению Д. Кэрнса "неучет сколь угодно малой корреляционной зависимости между измерениями при достаточно большом числе измерений может в сколь угодно большое число раз исказить получаемую оценку точности" [254, с. 170; 269].

Помимо конструирования возможно наилучших условий получения многофакторных моделей необходимо обеспечить комплексную проверку ее качества.

Важными вопросами получения моделей являются установление информативного подмножества главных эффектов и взаимодействий факторов, обеспечение устойчивости (корректности) структуры математической модели и значений оценок коэффициентов.

Выполнение указанных вычислений моделей и проверок для рядового пользователя должно обеспечиваться специализированным программным продуктом в виде интеллектуальных программных средств. По мнению многих аналитиков, анализирующих программные продукты отечественного производства, аналогичные признанные западные продукты неконкурентоспособны на отечественном рынке, "т.е. малопригодны для большинства специалистов, которым нужно анализировать с помощью методов прикладной статистики (обратное неверно!)" [270, с. 34].

Сформулируем краткие выводы по главе 6.

1. Успех использования математических методов для системной практики решения прикладных задач зависит от выполнения предпосылок, принятых в качестве условий применения математических абстракций. В прикладных исследованиях полное выполнение предпосылок практически невозможно. В зависимости от степени невыполнения принятых предпосылок для успешного решения задачи должны быть известны предварительные рекомендации и корректирующие действия.

2. В отличие от абстрактных областей знаний, где факт решения задачи может быть выражен в терминах "да" или "нет", в прикладных системных решениях количественных задач необходимо оценивать их качество. Оценка должна быть системным (по различным критериям качества), объективным (научно обоснованным, количественным, практически достаточным), в прикладном отношении приемлемым для достижения поставленной цели. Системное качество полученного решения выступает как подтверждение правильности первоначально принятых гипотез и используемых методов.

3. Выполнение комплекса вычислений по получению, проверке, анализу и использованию математических моделей должно обеспечиваться интеллектуальным программным средством, рассчитанным на рядовых пользователей, не специалистов в области планирования эксперимента, прикладной статистики, программирования. Пример такого интеллектуального программного обеспечения — программное средство "Планирование, регрессия и анализ моделей" [271, с. 44–46; 272, с. 140–142].

4. Создание и практическое использование прикладных комплексных методов исследования сложных систем для массового применения рядовыми пользователями предопределяет решение не абстрактных известных задач из определенных разделов математики, (решение которых стандартизовано), а достижение цели средствами математики с использованием вычислительной техники. Основная трудность состоит в получении решения задачи, соответствующей прикладной постановке и реальным возможностям заказчика — математическим, алгоритмическим, программным и др. Для получения решения неизбежно использование и формализованных, и не формализованных подходов.

Глава 7 Математическое моделирование многофакторных технологических систем

Основные тенденции в развитии конструирования и технологии изготовления разнообразных машин связаны с повышением качества изделий, уменьшением их себестоимости, сокращением сроков подготовки документации и освоения выпуска изделий. В последующих важных этапах жизненного цикла изделий — проведении испытаний, эксплуатации — также наблюдаются аналогичные тенденции.

В условиях рыночной экономики и надвигающейся конкуренции становится жизненно необходимым выполнение разработок с минимально возможными затратами ресурсов. Указанные цели могут быть достигнуты, если разработки будут оптимальными [273, с. 48—54].

Акад. Н.Д. Кузнецов, специалист в области проектирования реактивных авиационных двигателей, генеральный конструктор (под его руководством были созданы двигатели для Ту-114, Ту-154, Ан-22, Ил-62, Ту-144), считает, что "конструкторские решения, как правило, принимаются в результате поиска оптимума в многоэкстремальных задачах. При этом учитываются такие подчас противоречивые факторы, как необходимость обеспечения заданных прочностных показателей, выбор материалов с определенными свойствами и технологических процессов с учетом влияния технологической наследственности" [155, с. 51].

Рассматривая проблемы развития технологии машиностроения, д.т.н. Э.А. Сатель считал, что "математические методы для решения научных основ технологии машиностроения должны быть использованы не только для решения отдельных технологических задач, но и для выбора оптимального варианта технологического процесса... Можно отметить также начало использования кибернетических методов, логики вероятностей, математических моделей, аналоговых машин и др." [274, с. 6].

Д.т.н. А.С. Проников отмечал, что методы испытания металлорежущих станков превратились в глубокое экспериментальное исследование их "...характеристик с применением современных метрологических средств и регистрирующей аппаратуры, основанное на теоретических разработках и тщательном анализе всех основных факторов, определяющих работоспособность станка" [275, с. 35].

Определение парето-оптимальных решений, проведение комплексных испытаний разнообразных систем, их многокритериальная оптимизация должны стать неотъемлемыми компонентами подготовки к выпуску высококачественной продукции [276].

Реализация указанных задач возможна с использованием разработанных методов многофакторного математического моделирования и многокритериальной оптимизации. Рассмотрение решения реальных системных задач

позволяет ознакомиться с возможностями и качеством разработанной методологии.

7.1 Математическое моделирование упругих деформаций технологической системы

Моделировались упругие деформации технологической системы станка 16К20 для консольно закрепленной в трехкулачковом патроне цилиндрической заготовки из стали 40Х ГОСТ 4543-71 в состоянии поставки [277, 278]. Заготовка была свободно зажата (результаты y_1 , мкм) или поджата задним центром (y_2 , мкм), рис. 7.1. Нагрузка, имитирующая действие составляющей силы резания P_y , устанавливалась с помощью образцового динамометра сжатия ДОСМ-3-02 ГОСТ 5.1546-72 в пределах 200-2000 Н. Величина упругих перемещений в нагружаемом сечении фиксировалась с помощью индикатора часового типа 1 МИГ ТУ-2-034-305-71. Замеры деформаций проводились с точностью до 1 мкм. Сила изменялась в диапазоне $P(X_1) = 200-1000$ Н, длина консольной части заготовки $l(X_2) = 20-140$ мм, диаметр заготовки $d(X_3) = 18-50$ мм.

Прогноз упругих деформаций путем использования формулы из курса сопротивления материалов и ее модификаций не обеспечил необходимой точности: систематические ошибки прогноза были достаточно велики. Первоначально моделирование было проведено по плану 2-го порядка B_3 (план Бокса на кубе). Полученная математическая модель была неадекватна

$$F_{4;28}^{\text{эксп}} = 671 > F_{0,05;4;28}^{\text{табл}} = 2,7.$$

Область факторного пространства разделили на две подобласти и каждая подобласть описывалась отдельной математической моделью 2-го порядка, полученной по плану B_3 . Обе математические модели были также неадекватны.

$$F_{5;14}^{\text{эксп}} = 23 > F_{0,05;5;14}^{\text{табл}} = 2,96,$$

$$F_{5;14}^{\text{эксп}} = 336 > F_{0,05;5;14}^{\text{табл}} = 2,96,$$

Для обеспечения высокоточного прогнозирования деформаций технологической системы был проведен полный факторный эксперимент, в котором сила изменялась на трех уровнях (200; 600; 1000 Н), длина консольной части заготовки в точке замера деформации на четырех уровнях (20; 60; 100; 140 мм), диаметр заготовки — на пяти уровнях (18; 26; 34; 42; 50 мм). Было проведено 60 опытов; каждый опыт повторен 2 раза (табл. 7.1). Все необходимые вычисления проводились с использованием ПС ПРИАМ.

Таблица 7.1 Рабочая матрица плана эксперимента, результаты повторных опытов и расчетные значения откликов

№ п/п	Кодированные значения уровней варьирования факторов			Факторы			Функции									
				Натуральное обозначение			Натуральное обозначение									
	F ₁	F ₂	F ₃	P	l	d	y ₁ , мкм			y ₂ , мкм						
				Кодир. обозн.			Кодированное обозначение									
1	F ₁	F ₂	F ₃	F ₁	F ₂	F ₃	y ₁			y ₂						
2	0	0	0	200	20	18	Результаты повторных опытов	Расчет. знач. отк-лика	Результаты повтор. опытов	Расчет. знач. отк-лика						
3	1	1	1	600	60	26										
4	2	2	2	1000	100	34										
5	-	3	3	-	140	42										
6	-	-	4	-	-	50					U ₁₁	U ₁₂	ŷ ₁ , мкм	U ₂₁	U ₂₂	ŷ ₂ , мкм
7	О	15	44	И	1	200					20	18	12	13	12,6	8
8	п	57	51	с	2	200	20	26	11	10	11,0	8	7	8,5		
9	ы	44	29	п	3	200	20	34	8	8	8,5	7	7	7,4		
10	т	11	13	ы	4	200	20	42	8	9	8,6	7	8	8,1		
11		19	19	т	5	200	20	50	8	9	8,9	8	9	8,2		
12		48	43	а	6	200	60	18	38	39	38,8	13	13	11,1		
13		37	38	н	7	200	60	26	22	22	22,1	9	10	7,3		
14		4	42	и	8	200	60	34	12	12	11,3	8	9	7,7		
15		41	25	е	9	200	60	42	11	12	12,0	8	8	7,4		
16		40	57		10	200	60	50	9	9	8,9	8	7	8,2		
17		7	45		11	200	100	18	118	118	117,3	17	17	17,1		
18		13	20		12	200	100	26	50	50	50,3	9	10	9,7		
21		1	47		15	200	100	50	15	16	15,3	9	10	8,8		
22		8	40		16	200	140	18	268	266	267,0	25	26	26,8		
23		2	28		17	200	140	26	100	98	98,9	16	14	15,6		
31		39	58		25	600	20	50	22	23	21,9	18	19	17,5		
32		59	54		26	600	60	18	120	121	120,1	40	39	41,2		
33		55	23		27	600	60	26	68	68	67,6	27	28	26,9		
36		56	52		30	600	60	50	29	29	28,7	19	19	20,5		
37		24	10		31	600	100	18	348	350	350,2	58	54	54,9		
38		12	12		32	600	100	26	148	147	147,1	30	31	31,0		
41		29	14		35	600	100	50	43	44	44,3	24	25	24,7		
42		16	22		36	600	140	18	789	790	789,5	70	72	69,7		
43		47	21		37	600	140	26	281	280	280,6	36	41	38,3		
44		22	1		38	600	140	34	127	125	126,3	46	54	47,9		
45		42	46		39	600	140	42	80	80	80,3	31	32	30,8		
46		25	39		40	600	140	50	66	67	66,5	29	30	30,0		
54		28	7		48	1000	60	34	66	66	65,4	40	38	39,1		
57		32	37		51	1000	100	18	580	584	581,6	89	83	85,0		
58		10	24		52	1000	100	26	238	237	237,2	49	49	50,7		
60		38	31		54	1000	100	42	87	87	87,3	40	39	40,5		
61		26	34		55	1000	100	50	73	73	72,4	39	40	39,3		
62		20	17		56	1000	140	18	1296	1292	1293,9	101	105	104,4		
63		54	59		57	1000	140	26	463	461	462,1	60	65	61,8		
64		3	48		58	1000	140	36	218	214	215,8	62	69	66,1		
65		49	50		59	1000	140	42	137	140	138,3	52	54	53,1		
66		58	55		60	1000	140	50	112	112	112,0	48	50	48,1		

Примечание. Приведены отдельные фрагменты рабочей матрицы.

Математические модели имели вид

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 = & 121,43 - 129,31x_3 + 119,83x_2 - 158,30x_2x_3 + 79,95x_1 + 59,38z_3 - \\ & - 85,08x_1x_3 + 79,10x_1x_2 + 75,66x_2z_3 - 103,28x_1x_2x_3 + 38,93x_1z_3 - \\ & - 37,19z_2x_3 + 26,14z_2 + 49,26x_1x_2z_3 - 31,71x_2u_3 - 23,13u_3 + \\ & + 19,13z_2z_3 - 23,68x_1z_2x_3 + 16,65x_1z_2 - 21,71x_1u_2x_3 - 15,79x_1u_3 + \\ & + 12,00x_1z_2z_3 - 8,70z_2u_3 + 7,74x_2v_3 - 5,84x_1z_2u_3 + 3,70v_3 + \\ & + 5,98x_1x_2v_3 - 4,12u_2x_3 + 2,53u_2 + 2,90z_2v_3 + 3,54x_1v_3 + 2,12x_1u_2 + \\ & + 1,88u_2z_3 - 2,63x_1u_2x_3 + 1,91x_1z_2v_3 + 1,14x_1u_2z_3 + 1,02z_1x_3 + \\ & + 1,29z_1x_2x_3 - 1,09z_1x_2z_3 - 0,87u_2u_3 + 0,78z_1z_2x_3 - 0,64z_1z_2z_3 - \\ & - 0,40z_1 - 0,43z_1z_3 - 0,73z_1u_2v_3 + 0,48z_1z_2u_3 + 0,62z_1u_2u_3, \text{ мкм}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_2 = & 30,55 + 18,95x_1 + 10,33x_2 - 10,51x_3 - 6,95x_1x_3 + 6,18x_1x_2 - \\ & - 5,83x_2x_3 + 3,43z_3 + 3,09v_3 - 2,32u_3 + 3,46x_2v_3 + 2,25x_1z_3 + \\ & + 2,22x_2z_3 + 2,60x_2u_3 + 1,28z_2 - 2,27x_1x_2x_3 - 1,20z_1 + 1,58x_1x_2z_3 - \\ & - 1,35x_1u_2 + 1,43x_1v_3 - 1,55x_1x_2u_3 - 0,72z_2z_3 - 1,30z_1v_3 - 1,64z_1x_2v_3 + \\ & + 1,07z_1x_3 + 1,17x_1x_2v_3 + 0,73x_1z_2x_3 - 0,48x_1z_2z_3, \text{ мкм}. \end{aligned}$$

Формулы для вычисления ортогональных контрастов:

$$x_1 = 0,0025 (X_1 - 600); \quad z_1 = 1,5 (x_1^2 - 0,666667);$$

$$x_2 = 0,00166667 (X_2 - 80); \quad z_2 = 2,25 (x_2^2 - 0,555556);$$

$$u_2 = 3,75 (x_2^3 - 0,911111x_2);$$

$$x_3 = 0,0625 (X_3 - 34); \quad z_3 = 2 (x_3^2 - 0,5);$$

$$u_3 = 3,33333 (x_3^3 - 0,85x_3);$$

$$v_3 = 7,77778 (x_3^4 - 1,10714 x_3^2 + 0,128571).$$

Адекватность математических моделей

$$F_{13;60}^{\text{экс}} = 1,6 < F_{0,05;13;60}^{\text{таб}} = 2,297,$$

$$F_{13;60}^{\text{экс}} = 1,88 > F_{0,05;32;60}^{\text{таб}} = 1,71.$$

Обе модели приемлемы для использования.

Доли рассеивания, объясняемые моделями: 0,999996; 0,9979 — очень высокие. Коэффициенты множественной корреляции $R = 0,999998$; 0,998933 весьма близки к 1 и статистически высокозначимы: F -отношения для R равны 63232; 554 при табличных значениях 1,83; 1,95. Информативность моделей очень высокая. Критерий Бокса и Веца для информативности больше 49 для первой модели и равен 14 для второй.

Число обусловленности для обеих моделей $\text{cond} = 1$: коэффициенты максимально устойчивы относительно их случайных возмущений.

Эффективность извлечения полезной информации — 100 %. Коэффициенты моделей отвечают критериям *D*-, *A*-, *E*-, *G*-оптимальности. Они также ортогональны, информационно семантически.

Математическое моделирование по схеме полного факторного эксперимента позволило получить прецизионные математические модели, удовлетворяющие всему комплексу необходимых требований.

Использование аналогичных многофакторных математических моделей совместно с обработкой на станках с числовым программным управлением позволяет для нежестких деталей программно предсказать траекторию движения инструмента и добиться более точной обработки без увеличения числа проходов инструмента.

Общий вывод: математические модели соответствуют всем необходимым критериям качества и могут быть использованы для прогноза упругих деформаций технологической системы станка 16К20.

7.2 Математическое моделирование и оптимизация конструкции и технологии изготовления спиральных монолитных твердосплавных сверл (СМТС) по критерию стойкости. Системный анализ влияния факторов на критерии качества технологического процесса

Высококачественное производительное получение отверстий в печатных платах — сложная, системная задача. Основной способ их образования — сверление СМТС. Системный анализ факторов показал, что на состояние печатных плат, условия и режимы сверления, качество СМТС влияет не менее 139 факторов. Экспертный анализ позволил выделить 20 факторов, формирующих в значительной части конструкцию сверла и технологию образования качественного отверстия для последующей его металлизации [279, 280, 281].

Список выделенных для моделирования факторов включает качественные и количественные, простые и сложные, дискретные и непрерывные факторы и их уровни (рис. 7.2).

1. X_1 — смазочно-охлаждающая жидкость для вышлифовки стружечных канавок СМТС, $C_{ск}$ (сунграинл - 600X (США); МР-10 (СССР)).
2. X_2 — спекание заготовок СМТС, C_3 (одностадийное; двустадийное).
3. X_3 — связка алмазного круга для окончательного шлифования рабочей части СМТС, $CB_{рч}$ (В2-01; В2-08).
4. X_4 — вид пооперационной очистки заготовок СМТС, ПО (бензин; ультразвуковая обработка + Лабомид).
5. X_5 — зернистость алмазного круга для вышлифовки стружечных канавок СМТС, $Z_{ск}$, мкм/мкм (50/40; 40/28; 28/20).

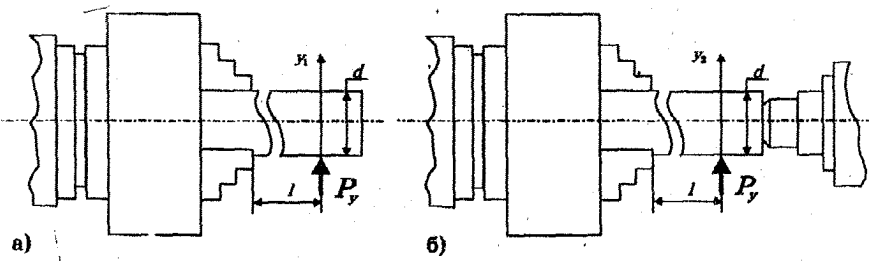


Рис. 7.1. Схема моделирования упругих деформаций технологической системы станка 16К20: а) заготовка консольная; б) заготовка поджата центром

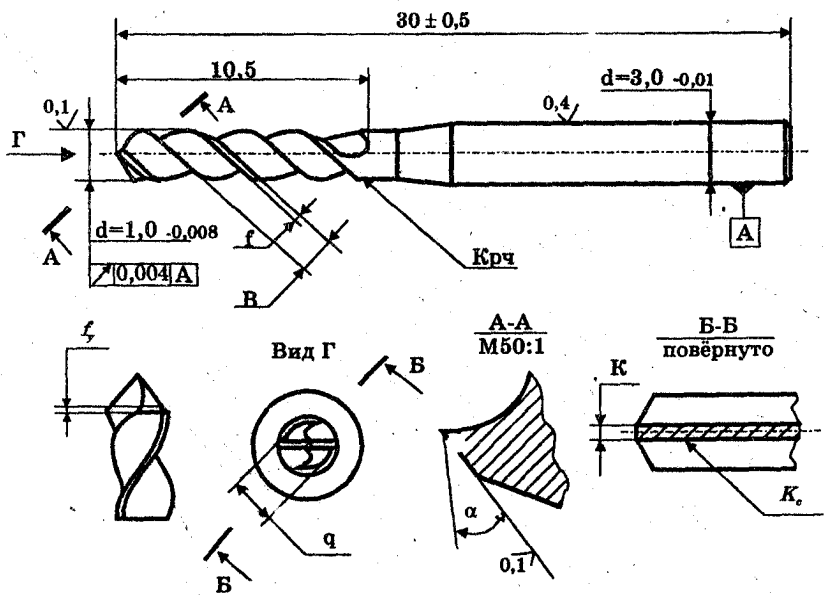


Рис. 7.2. Факторы моделирования конструкции спиральных монолитных твёрдосплавных свёрл

6. X_6 — связка алмазного круга для вышлифовки стружечных канавок СМТС, СВ_{ск} (В2-08; МС6П; Винтер (ФРГ)).
7. X_7 — вид упрочняющей обработки, УО (исходные (неупрочненные) СМТС; УЗО (выдержка 1,0 мин); УЗО (выдержка 1,5 мин)).
8. X_8 — зернистость алмазного круга для окончательного шлифования рабочей части СМТС, $Z_{рч}$ мкм/мкм (40/28; 28/20; 20/14).
9. X_9 — марка твердого сплава, М (ВК6-М; ВК6-ОМ; ОМС).
10. X_{10} — величина конусности (обратной) по рабочей части СМТС, $K_{рч}$ мм/10 мм (0,005; 0,015; 0,025).
11. X_{11} — диаметр по спинке СМТС, d , мм (0,75; 0,85; 0,95).
12. X_{12} — связка алмазного круга для доводки СМТС, СР_д (В15СС50, ВЕС50, ВЗС50 (HAWERA, ФРГ); БСТК; МС6П; Б11-Л).
13. X_{13} — величина уголка СМТС, f_y , мм (0; 0,05; 0,10; 0,15).
14. X_{14} — величина конусности (прямой) по сердцевине СМТС, K_c , мм/10 мм (0,05; 0,10; 0,15; 0,20).
15. X_{15} — ширина ленточки по спирали СМТС f , мм (0,04; 0,10; 0,16; 0,22).
16. X_{16} — ширина пера СМТС, B , мм (0,3; 0,4; 0,5; 0,6).
17. X_{17} — толщина сердцевины СМТС, K , мм (0,13; 0,19; 0,25; 0,31).
18. X_{18} — основной задний угол СМТС, α , град (12; 14; 15; 17).
19. X_{19} — износостойкое покрытие, ИП (iC; TiN; без покрытия; Al₂O₃).
20. X_{20} — разбиение плана эксперимента на ортогональные блоки, Б (0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7).

За обобщенный критерий качества работы СМТС была выбрана максимальная путевая наработка L (в погонных метрах) после всех переточек сверла, которая коррелирует со всеми 9 показателями, характеризующими интенсивность, надежность и эффективность процесса сверления, а также со стоимостью получения одного отверстия в печатных платах и является обобщенным технико-экономическим критерием.

С учетом числа факторов и числа их уровней был выбран многофакторный регулярный план эксперимента $2^4 \times 3^7 \times 4^8 \times 8^1 / / 64$, т.е. дробный факторный эксперимент. Полный факторный эксперимент (без блочного фактора) включает 2 293 235 712 опытов. Эффективность извлечения полезной информации из исходных данных составляет 96,2 %. План эксперимента был разбит на 8 ортогональных блоков, по 8 опытов в каждом блоке. Рандомизация эксперимента осуществлялась внутри блоков и между самими блоками.

Вычисление математической модели и поиск оптимальных условий образования отверстий были проведены с использованием ПС ПРИАМ. Полученная математическая модель имеет вид

$$\hat{y}(L) = 14,859 - 2,466x_{17} - 2,253x_{16} - 1,951x_{15} - 0,560x_2z_7 + 1,717x_{20} - \\ - 1,453z_7 - 2,090x_8 + 1,269x_2 - 1,231x_5 + 1,121x_4 + 1,098x_9 + \\ + 1,493x_1z_{14} + 0,822z_{20} - 1,008x_{19} - 0,865z_9 - 1,804x_1x_2x_3x_{14} + \\ + 1,091x_1 + 0,720v_{20} + 0,758z_{12} + 0,720x_6 + 0,698x_{12} + 0,515x_3 - \\ - 0,497x_2z_{12}, \text{ м,}$$

где x_i , z_i , v_i — соответственно линейные, квадратичные, кубические ортогональные контрасты i -го фактора ($1 \leq i \leq 20$). Для вычисления значений $\hat{y}(L)$ необходимо также использовать нормировочные коэффициенты k_{x_i} , k_{z_i} , k_{v_i} , которые рассчитываются по алгоритмам программного обеспечения.

Результаты статистического анализа многофакторной математической модели приведены в табл. 7.2. Здесь и далее приняты следующие условные обозначения: f_s^2 , $f_{ад}$, f_k , f_R — число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости результатов экспериментов s_y^2 , дисперсии адекватности, дисперсии, связанной с k' коэффициентами модели, остаточной дисперсии соответственно [131, 249, с. 9–14].

Анализ математической модели показывает, что наибольшее системное влияние оказывают 1, 2, 5, 7, 12, 14 факторы. Проверка гипотезы об однородности дисперсий показала, что они в незначительной степени не однородны. Проверка устойчивости коэффициентов математической модели проводилась по двум критериям устойчивости и показала, что коэффициенты высокоустойчивы. Математическая модель в незначительной степени неадекватна. Неадекватность модели — следствие рассеивания полезной информации по значительному числу (многие тысячи) взаимодействий факторов. Математическая модель объясняет 96 % рассеивания результатов. Если учесть, что фактор разбиения эксперимента на ортогональные блоки (Б) объясняет 11,3 % систематических неоднородностей в проводимом эксперименте, то адекватность и предсказывающие свойства полученной модели следует в системном смысле считать хорошими. Коэффициент множественной корреляции $R = 0,98$ достаточно близок к 1 и статистически высокозначим: информативность модели высокая.

Вывод: модель можно использовать в целях изучения процесса сверления печатных плат, прогноза стойкости и поиска оптимальной конструкции сверла и технологии его изготовления.

Наиболее сильные эффекты математической модели объясняют следующие доли рассеивания максимального пути сверления L после всех переточек сверла.

1. Толщина сердцевины СМТС, $K(X_{17}) - 14,7 \%$ (рис. 7.2).
2. Ширина пера СМТС, $B(X_{16}) - 12,3 \%$.
3. Блоковой фактор — совокупность неуправляемых и неконтролируемых факторов как систематических неоднородностей, $B(X_{20}) - 11,3 \%$.

Таблица 7.2 Результаты статистического анализа многофакторной математической модели

Параметры статистического анализа	Условные обозначения	Значения параметров
Проверка гипотезы об однородности дисперсий	s_y^2	0,590
	s_y	0,768
	$f s_y^2$	192
	$G_{расч}$	0,114
	$G_{табл}$	0,106
	α	0,01
Число обусловленности	$cond 1$	5,40
	$cond 2$	4,16
Проверка гипотезы об адекватности математической модели	$s_{ад}^2$	2,724
	$F_{расч}$	4,618
	$F_{табл}$	1,458
	$J_{ад}$	40
	α	0,05
Доля рассеивания, объясняемая моделью	$Q_{\bar{y}}$	0,959
Величина и значимость коэффициента множественной корреляции	R	0,979
	$f_{k'}$	23
	f_R	232
	$F_{расч}$	40,4
	$F_{табл}$	1,89
α	0,01	
Значение параметра для критерия Бокса и Веца	γ	4
Информативность модели		Высокая
Средняя погрешность аппроксимации, %	$\bar{\varepsilon}_y$	9,24

- Ширина ленточки по спирали СМТС, $f(X_{15}) - 9,2 \%$.
- Эффект взаимодействия факторов СОЖ для вышлифовки стружечных канавок и величина конусности (прямой) по сердцевине СМТС, $C_{ск} - K_c (X_1 X_{14}) - 9,0 \%$.
- Вид упрочняющей обработки, $УО(X_7) - 5,1 \%$.
- Зернистость алмазного круга для окончательного шлифования рабочей части СМТС, $З_{рч}(X_8) - 4,7 \%$.
- Марка твердого сплава, $М(X_9) - 4,7 \%$.

9. Спекание заготовок СМТС, $C_3(X_2)$ — 3,9 %.

10. Зернистость алмазного круга для вышлифовки стружечных канавок СМТС, $Z_{ск}(X_5)$ — 3,7 %.

Другие эффекты в математической модели имеют доли рассеивания менее 3,11 %.

Системный учет и комплексная оптимизация конструктивных факторов СМТС, технологии их изготовления, упрочнения, эксплуатации и восстановления дали возможность одновременно повысить ресурс работы сверла в 5–6 раз, производительность сверления печатных плат довести до 100–150 ходов/мин и гарантировать (100 %) на последующей операции металлизации стенок отверстий сплошной плотный мелкокристаллический слой химически осажденной меди без разрывов и царапин. Работоспособность СМТС была повышена до 32 погонных метра. При работе на станках с ЧПУ группой сверл необходимо уменьшить общую длину просверленных отверстий до 20–22 м.

Работа была внедрена на производственном объединении им. С.П. Королева и в лаборатории твердосплавного инструмента налажен выпуск СМТС по усовершенствованной технологии.

Рассмотрение результатов математического моделирования показывает, что успешно реализованы: системный подход моделирования в виде количественного анализа влияния одновременно 20 конструкторских и технологических факторов; существенное уменьшение влияния систематических неоднородностей многофакторного эксперимента в виде совокупности неуправляемых и неконтролируемых факторов; системное определение оптимальных условий (корреляционный учет 9 критериев качества, в том числе интенсивности, надежности, эффективности) процесса сверления спиральными монолитными твердосплавными сверлами.

7.3 Математическое моделирование и оптимизация технологических условий сварки полиэтиленовых труб по системному критерию качества

Использование пластмассовых труб взамен стальных экономически весьма выгодно. Однако монтаж их, особенно в условиях действующих предприятий, с целью замены износившихся связан со значительными трудностями. Необходимо оптимизировать технологические условия сварки трех типов полиэтиленовых труб по нескольким критериям качества [247, 282, 283, 284, с. 163–173].

Были выбраны следующие критерии качества:

y_1 — разрушающее напряжение при растяжении σ_B , МПа; $y_1 \rightarrow \max$.

y_2 — относительное удлинение, соответствующее образованию трещины при растяжении образца ε , %; $y_2 \rightarrow \max$.

y_3 — ударная вязкость a_{ki} , кДж/м; $y_3 \rightarrow \max$.

U_4 — составляющая вязкого разрушения при изломе образца S_b , %;
 $U_4 \rightarrow \max$.

U_5 — высота грата в зоне сварки полиэтиленовых труб $h_{от}$, %;
 $U_{5min} \leq U_5 \leq U_{5max}$.

U_6 — ширина грата в зоне сварки $b_{от}$, %; $U_{6min} \leq U_6 \leq U_{6max}$.

Исследовалось влияние следующих факторов:

X_1 — тип трубы, %, (качественный фактор на трех уровнях): толщина стенки тяжелой трубы (типа Т) равна 28 мм (принята за 100 %); средней трубы (типа С) — 18 мм (64 % толщины тяжелой трубы); среднелегкой трубы (типа СЛ) — 12 мм (43 % толщины тяжелой трубы). В соответствии с толщиной труб коэффициент K_{X_1} , характеризующий пропорциональное время прогрева труб, равен 1; 0,64; 0,43.

X_2 — температура нагревательного инструмента (t_n), $X_2 = 180; 230; 280; 330^\circ\text{C}$.

X_3 — время оплавления свариваемых торцов ($t_{оп}$), с, зависящее от температуры нагревательного инструмента, типа трубы и уровня варьирования фактора $X_3(t_{оп})$. Его оптимальные значения ($t_{опт X_2}$), принятые за 100 % и полученные в предварительных опытах, для труб типа Т равны 570 с для $t_n = 180^\circ\text{C}$, 360 с для $t_n = 230^\circ\text{C}$, 230 с для $t_n = 280^\circ\text{C}$ и 100 с для $t_n = 330^\circ\text{C}$. Сварка при температуре нагрева инструмента 180°C и времени оплавления свариваемых торцов 100 с практически оказалась невозможной. При температуре нагрева 330°C и времени оплавления свариваемых торцов 570 с также были получены некачественные изделия.

Из приведенного следует, что фактор X_3 закоррелирован с факторами X_1 и X_2 . Предложено фактор X_3 в матрице плана эксперимента менять на четырех уровнях в относительных значениях (процентах) от оптимальных значений, найденных в предварительных опытах: 70, 90, 110, 130 %.

В рабочей матрице, по которой проводится технологический эксперимент, время оплавления свариваемых торцов определялось по формуле $t_{оп} = t_{опт X_2} K_{X_1} X_3$. Таким образом, фактор X_3 в матрице плана эксперимента был представлен ортогонально, а в рабочей матрице закоррелирован с факторами X_1 и X_2 . Вычисления коэффициентов модели проводились по матрице плана эксперимента с ортогональным представлением фактора X_3 .

X_4 — давление осадки труб ($p_{ос}$), МПа; $X_4 = 0,05; 0,10; 0,20; 0,30$.

В качестве плана эксперимента был выбран многофакторный регулярный план $3^1 \times 4^3 / 32$. С использованием ПС ПРИАМ были получены следующие многофакторные математические модели:

$$\hat{y}_1 = 26,55 + 1,71x_1 - 0,74z_1 - 2,47x_2 - 2,31z_2 - 0,58v_2 - 0,67x_3 + 0,40v_3 + 1,26x_4 + 1,38x_1z_2 - 0,31x_1v_3 - 0,53x_1z_4 - 0,36z_1x_2 - 0,46z_1z_4 - 0,40x_2v_3 - 0,39z_2x_3 + 0,65z_2v_3,$$

$$\hat{y}_2 = 18,98 + 3,91x_1 - 3,63x_2 - 4,87z_2 - 1,66x_3 - 1,57z_4 - 1,12x_1v_3 - \\ - 2,05x_1z_4 - 1,31z_1x_2 + 2,16z_1v_2 - 1,42z_1v_3 - 1,21z_1z_4 + 8,42x_2z_4 - \\ - 1,03x_2v_4 + 1,40z_2x_3 + 7,38z_2v_3 + 1,32z_2x_4 + 7,31z_3v_4,$$

$$\hat{y}_4 = 56,12 + 9,39x_1 - 9,12z_1 - 4,95x_2 - 17,52z_2 - 7,03z_4 + 3,75x_1z_2 - \\ - 4,03x_1v_3 - 6,61x_1z_4 - 10,39z_1x_2 + 6,19z_1v_2 - 2,78z_1v_3 - 3,93x_2v_4 + \\ + 7,03z_2x_3 - 2,52x_3z_4,$$

$$\hat{y}_5 = 14,67 - 8,49x_1 - 5,38x_2 - 10,58z_2 + 14,16x_3 + 10,35x_4 - 3,88z_4 - \\ - 2,30x_2x_3 + 1,98z_2x_3 - 2,79x_3x_4,$$

$$\hat{y}_6 = 160,03 + 6,83x_1 - 7,72z_1 - 7,44x_2 - 18,69z_2 + 24,96x_3 + 27,56x_4,$$

где x_i , z_i , v_j - соответственно линейные, квадратичные, кубические ортогональные контрасты i -го фактора ($1 \leq i \leq 4$).

Для вычисления значений \hat{y}_j необходимо также использовать нормировочные коэффициенты k_{x_i} , k_{z_i} , k_{v_j} .

Результаты статистического анализа математических моделей приведены в табл. 7.3.

Анализ величины и значимости коэффициента множественной корреляции R для \hat{y}_3 показал, что модель не информативна, т.е. не несет полезной информации. Факторы X_1, \dots, X_4 в диапазонах их изменения не оказывают статистически значимого влияния (не изменяют по отношению к исходным значениям) на критерий качества y_3 - ударная вязкость. Поэтому модель \hat{y}_3 не использовалась при совместной оптимизации с остальными критериями качества.

Проверка гипотез об однородности дисперсий показала, что все дисперсии (для различных откликов) однородны. Числа обусловленности для моделей изменялись в диапазоне 1,00-5,37; коэффициенты для всех моделей устойчивы. Математические модели адекватны (кроме модели \hat{y}_6 , которая неадекватна). Для всех моделей коэффициенты множественной корреляции достаточно близки к единице и статистически значимы.

Совместная оптимизация критериев качества y_1, y_2, y_4, y_5, y_6 проводилась с использованием метода случайного поиска с ЛПТ равномерно распределенными последовательностями. Поиск оптимальных условий проводился для различных типоразмеров труб Т, С, СЛ.

Критерии качества y_5 и y_6 были ограничены в пределах 67-133 % и 60-140 % соответственно. При этом изменение критериев y_5 и y_6 существенно не влияет на прочностные характеристики свариваемых образцов. Поэтому были проведены оптимизации без ограничений и с различными ограниче-

ниями для y_5 и y_6 . Результаты совместно оптимизированных откликов и соответствующие им значения факторов приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.3 Результаты статистического анализа многофакторных математических моделей

Параметры статистического анализа	Условное обозн.	Значения параметров для моделей					
		\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3	\hat{y}_4	\hat{y}_5	\hat{y}_6
Проверка гипотезы о воспроизводимости результатов экспериментов	s_y^2	3,254	12,359	1,240	36,176	20,078	64,156
	s_y	1,80	3,52	1,11	6,01	4,49	8,01
	$f s_y^2$	32,0					
	$G_{расч}$	0,24	0,12	0,16	0,12	0,25	0,17
	$G_{табл}$	0,28					
	α	0,05					
Значение критерия Стьюдента	$f_{табл}$	2,037					
Число обусловленности	$cond$	2,82	5,37	19,9	2,59	2,99	1,0
Проверка адекватности математической модели	$F_{расч}$	1,29	0,65	0,93	0,92	0,93	4,68
	$F_{табл}$	1,99	2,03	1,91	1,96	1,89	1,86
	$f_{ал}$	15,0	14,0	21,0	17,0	22,0	25,0
	α	0,05					
Величина и значимость коэффициента множественной корреляции	R	0,953	0,977	0,582	0,942	0,989	0,943
	f_k	16,0	17,0	10,0	14,0	9,0	6,0
	f_R	47,0	46,0	53,0	49,0	54,0	57,0
	$F_{расч}$	9,47	18,0	1,05	9,66	109,1	33,62
	$F_{табл}$	2,42	2,35	4,12	2,56	2,61	3,14
	α	0,01					

Проведенное комплексное технологическое исследование полностью подтвердило предложенный подход выбора робастного (устойчивого) плана эксперимента для вычисления группы математических моделей и устойчивого оценивания коэффициентов математической модели в случае закоррелированности факторов. Использование ПС ПРИАМ позволило провести все необходимые вычисления по получению группы моделей и получить оптимальные их варианты.

Результаты решения задач были использованы для монтажа пластмассовых трубопроводов на химических производствах трестов строительного производства "Оргтехстрой" (г. Свердловск), "Промтехмонтаж-1" (г. Харь-

ков), "Азнефтехиммонтаж" (г. Баку), производственного строительного-монтажного объединения "Промтехмонтаж" (г. Минск). Фактический народнохозяйственный эффект за 1985—1987 гг. составил 896398 руб. и подтвержден документами [247].

Таблица 7.4 Оптимальные значения факторов и соответствующих им критериев качества для различных типов труб

Обозначение функций и факторов	Для тяжелой трубы			Для средней трубы			Для СЛ трубы		
	без ограничений $h_{от}$ и $b_{от}$	при ограничениях $h_{от}^*$	при ограничениях $h_{от}$ и $b_{от}$	без ограничений $h_{от}$ и $b_{от}$	при ограничениях $h_{от}^*$	при ограничениях $h_{от}$ и $b_{от}$	без ограничений $h_{от}$ и $b_{от}$	при ограничениях $h_{от}^*$	при ограничениях $h_{от}$ и $b_{от}$
$\sigma_{от}$, МПа	30	30	28	32	30	30	32	32	30,8
ε , %	23	23	24	31	34	35	45	38	36
S_b , %	82	82	75	112	132	118	118	99	85
$h_{от}$, %	125	125	110	135	127	102	151	130	123
$b_{от}$, %	180	180	140	211	188	143	199	157	140
$t_{от}$, °C	246	246	264	262	285	277	220	119	278
$t_{оп}$, с	258	258	200	145	111	124	176	208	73
$p_{от}$, МПа	0,25	0,25	0,16	0,28	0,24	0,06	0,19	0,14	0,14

*) ограничения в пределах $67 \leq h_{от} \leq 133$, $60 \leq b_{от} \leq 140$.

7.4 Математическое моделирование шестикомпонентных тензометрических измерительных систем

При проведении исследований по обработке металлов резанием, продувке моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах (рис. 7.3), бурении скважин используются многофакторные измерительные системы: для замера возникающих сил и крутящих моментов. Идеальная конструкция многоканальной измерительной системы предполагает линейную взаимосвязь между одноименными входами и выходами, взаимонезависимость различных каналов друг относительно друга. Реальные многоканальные измерительные системы характеризуются наличием влияния других каналов, взаимовлиянием каналов на рассматриваемый канал и позволяют классифицировать их как сложные [261, 285, 286].

Как показывает практика, устранить указанные несовершенства измерительных систем только за счет конструкторских и технологических реше-

ний не представляется возможным. Было предложено использовать многофакторное математическое моделирование для градуировки таких измерительных систем, учета влияния и взаимовлияния факторов на определенные каналы, их нелинейностей.

На рис. 7.4 показана модель сложной шестикомпонентной измерительной системы. Кроме трех сил — P_x, P_y, P_z — и трех крутящих моментов — M_x, M_y, M_z — на результаты измерений влияют неуправляемые (Z_1, \dots, Z_n) и неконтролируемые (W_1, \dots, W_l) факторы, которые входят в модель в неявном виде.

Учитывая, что математическое моделирование должно описывать измерительную систему, в качестве плана эксперимента был выбран квази- D -оптимальный план второго порядка на кубе типа B_6 . План содержит 45 опытов. Каждый опыт был повторен 2 раза. Проведение эксперимента было рандомизировано.

Каждый из факторов изменялся в эксперименте на трех уровнях. Все линейные эффекты и взаимодействия факторов ортогональны; свободный член и коэффициенты при квадратичных членах слабо коррелированы между собой:

$$\text{cor}(b_0, b_{ii}) = -0,09; \quad \text{cor}(b_{ii}, b_{jj}) = -0,18.$$

Для кодированных значений факторов $x_1(P_x), \dots, x_6(M_z)$ были получены следующие математические модели сил и крутящих моментов.

$$\hat{y}_1(y_{P_x}) = -725,8 + 1445,5x_1 - 105,4x_2 - 302,6x_6 - 106,8x_3x_5 - 33,1x_3x_6 + 29,7x_4x_5 - 79,9x_1^2,$$

$$\hat{y}_2(y_{P_y}) = 3375,7 - 92,8x_1 - 2700,6x_2 + 458,1x_3 + 535,3x_4 + 42,8x_5 - 4674,6x_6 - 7,4x_1x_3 + 8,9x_2x_3 - 10,4x_2x_5 + 8,0x_2x_6 - 7,6x_3x_4 + 15,8x_3x_5 + 16,9x_3x_6 + 8,6x_4x_5 - 34,7x_5^2,$$

$$\hat{y}_3(y_{P_z}) = 130,5 + 8,6x_1 + 1547,7x_3 + 4464,9x_5 + 23,6x_6 + 12,3x_3x_6 + 17,6x_4x_5 + 36,7x_5^2,$$

$$\hat{y}_4(y_{M_x}) = 234,6 + 299,7x_3 + 352,8x_4 - 6,9x_6 + 5,6x_3x_6,$$

$$\hat{y}_5(y_{M_y}) = 3264,9 + 64,9x_1 + 23,2x_2 + 12,1x_4 + 20,2x_5 + 2979,8x_6 + 10,7x_3x_5 - 7,6x_5x_6 + 24,1x_6^2,$$

$$\hat{y}_6(y_{M_z}) = 813,7 + 51,0x_3 + 3573,5x_5 + 9,7x_6 + 18,2x_4x_5 + 19,4x_5x_6.$$

Анализ полученных математических моделей полностью подтвердил исходные предположения: каждый из шести информационных каналов воспринимает информацию и от других каналов, а также взаимовлияние факто-

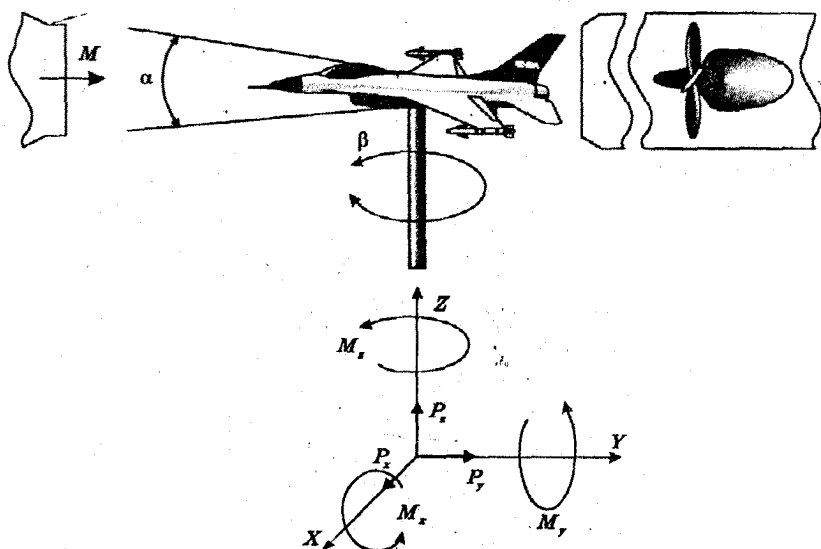


Рис. 7.3. Общая схема установки для замеров сил и крутящих моментов, возникающих при испытаниях моделей летательных аппаратов

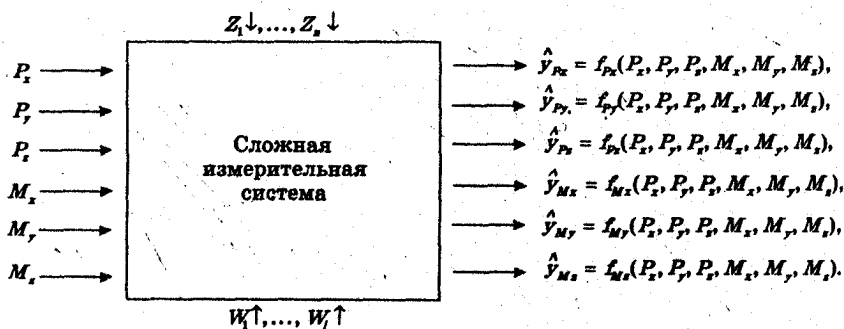


Рис. 7.4. Модель сложной шестикомпонентной измерительной системы

ров и нелинейности, которые искажают исходную информацию конкретного канала и создают систематические ошибки.

Результаты статистического анализа математических моделей приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5 Результаты статистического анализа многофакторных математических моделей

Параметры статистического анализа	Условные обозначения	Натуральное обозначение критериев качества					
		y_{P_x}	y_{P_y}	y_{P_z}	y_{M_x}	y_{M_y}	y_{M_z}
		Кодированное обозначение критериев качества					
		\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3	\hat{y}_4	\hat{y}_5	\hat{y}_6
Проверка гипотезы о воспроизводимости результатов экспериментов	s_y	77,9	24,6	33,9	18,9	23,8	30,6
	$f s_y^2$	44					
	$G_{расч}$	0,139	0,126	0,150	0,188	0,096	0,124
	$G_{табл}$	0,224					
	α	0,05					
Проверка гипотезы об адекватности	$f_{ад}$	36	28	36	39	35	38
	$F_{расч}$	1,60	2,20	3,66	1,44	2,03	2,25
	$F_{табл}$	1,68	2,24	не адекватна	1,67	2,10	2,253
	α	0,05	0,008		0,05	0,01	0,005
Величина и значимость коэффициента множественной корреляции	R	0,9995	0,9999	0,9999	0,9997	0,9999	0,9999
	$f_{k'}$	7	15	7	4	8	5
	f_R	80	72	80	83	79	82
	$F_{расч}$	394	46585	14319	674	15526	12854
	$F_{табл}$	2,90	2,32	2,90	3,59	2,77	3,27
	α	0,01					

Проверка гипотез об однородности дисперсий показала, что для каждой из шести совокупностей исходных данных дисперсии однородны. Проверка гипотезы об адекватности математических моделей показала, что модели \hat{y}_1 , \hat{y}_4 адекватны, модели \hat{y}_2 , \hat{y}_3 , \hat{y}_6 близки к адекватным и модель \hat{y}_3 неадекватна. Величина множественных коэффициентов корреляции для всех откликов близка к единице. Информативность всех математических моделей весьма высокая, что позволяет использовать модель и в случае ее неадекватности. Коэффициенты моделей устойчивы, так как план эксперимента B_6 квази-D-оптимальный.

Вывод: все модели можно использовать для определения значений P_x, \dots, M_z с исключением функционально-систематических погрешностей.

Предложенный метод может быть применен в качестве системной математической коррекции траектории движения и цели сложных систем (независимо от их предметной области), если физические методы не могут дать требуемой точности и качества конечного результата.

7.5 Принцип информационной коррекции переменных систематических ошибок технологических систем, измерительных технологических средств

Современные технологические системы и измерительные технологические средства при эксплуатации в производственных (машиностроительных) условиях подвержены влиянию значительного числа неуправляемых и неконтролируемых факторов: температуры, влажности, давления воздуха окружающей среды, толчков, вибраций и др. Среда, в которой они используются для выпуска продукции и проведения замеров в системах активного контроля обрабатываемых деталей или при проведении комплексных экспериментальных исследований технологических и технических систем, не позволяет или значительно затрудняет обеспечение нормальных условий их эксплуатации.

Исследователь "и его приборы так прочно связаны с остальной частью Вселенной, так органически погружены в нее, что даже мысленное разделение их невозможно" [287].

Хорошей иллюстрацией этого теоретического тезиса может быть влияние приливных волн, вызванных Луной в земной коре, на изменение энергии заряженных частиц, полученных на большом кольцевом ускорителе в Центре европейских ядерных исследований [288]. Приливная волна деформирует 27-километровое ($2,7 \times 10^7$ мм) кольцо ускорителя и изменяет длину пробега частиц по кольцу приблизительно на 1 мм (!). Это приводит к изменению энергии ускоренной частицы почти на десять миллионов электронвольт. Указанные изменения очень малы, но превышают возможную ошибку измерений примерно в десять раз и уже привели к серьезной ошибке в измерении массы бозона.

Для получения высокого качества обработки и измерений технологические системы и средства измерений должны быть прецизионными, а процесс обработки и измерений должен проводиться в нормальных (стандартных) условиях. Создание прецизионного технологического оборудования, высокоточных средств измерений и нормальных условий для проведения обработки и измерений представляет значительные технические и технологические трудности и требует существенных финансовых затрат.

Специалисты в области высокоточной обработки и средств измерений обращают внимание на трудности учета всех факторов, влияющих на точность технологического процесса, решения системы большого числа уравнений [38, с. 122]. Влияние факторов внешней среды на погрешности средств

измерений плохо поддаются теоретическому анализу; оно сложно, нестабильно, трудно интерпретируемо, изменчиво при переходе от экземпляра к экземпляру одного и того же типа средств измерений [289, с. 111]. В результате приведенных причин делается вывод, что для группы средств измерений одного типа наиболее адекватным описанием погрешностей средств измерений от влияющих факторов внешней среды следует признать зону неопределенности, границы которой определяются крайними зависимостями экземпляров [289, с. 112].

Отмечается важная особенность погрешностей: ввиду малости для большинства технических средств измерений случайных погрешностей можно предполагать, что погрешность данного экземпляра средства измерения в каждой точке является систематической и описывается постоянной величиной [289, с. 138]. Для их системного описания необходимо использовать многофакторные математические модели.

Рассматривая естественнонаучную стратегию обеспечения точности оценивания результатов количественного химического анализа д.т.н. Ю.И. Алимов и д.х.н. А.Б. Шаевич обращают особое внимание на необходимость исключения систематических погрешностей из исходных результатов замеров [290, с. 1894—1897]. Анализируя изменение оценок различных физических констант, которые наука считает практически неизменными, можно прийти к выводу, что систематическая погрешность результата была существенной в том смысле, что она превышала случайную [290, с. 1895].

Из приведенного локального обзора следует вывод, что систематическая погрешность является основным источником уменьшения точности обработки деталей и замеров физических величин.

Автором предложена (в 1979—80 гг.) концепция использования многофакторных математических моделей для информационной коррекции переменных систематических ошибок технологических систем и измерительных технологических средств [261, 291, 292, 293, 294]. Она заключается в следующем.

Проводят специальный многофакторный метрологический эксперимент, в котором помимо основного фактора (или факторов) учитывают влияние на результат обработки детали (или измерения) неуправляемых ("мешающих") факторов. В качестве плана эксперимента используется полный факторный эксперимент или многофакторный регулярный план, робастный к выбору структуры математической модели. В полученной модели учитываются методические, инструментальные, дополнительные, систематические, прогрессирующие (дрейфовые) погрешности в виде соответствующих коэффициентов. Указанную совокупность систематических ошибок следует классифицировать как функционально-систематическую: ошибки изменяются в зависимости от изменения значений неуправляемых факторов и конкретной технологической системы или средства измерения.

Многофакторная математическая модель отображает в количественном виде влияние "мешающих" факторов, нелинейности, взаимовлияния

факторов и тем самым позволяет в информационном смысле учесть их и исключить из первичных результатов замеров. Модель позволяет количественно проанализировать в системном плане физические несовершенства технологического оборудования, средства измерения, проранжировать и проанализировать источники функциональных систематических погрешностей и установить их структурную связь. Указанные влияния можно учесть в информационном смысле и скорректировать получаемый размер обработки или результат технологических измерений.

Использование математических моделей, т.е. цифровых результатов и, следовательно, цифрового метода в противоположность аналоговому, позволяет абстрагироваться от предметной области, системы, в частном случае технологического процесса или средства измерения и предложить указанную концепцию как концепцию коррекции достижения цели, поставленной перед произвольной системой (технической, технологической, измерительной и др.) при условиях ограничения исходной информации, влияния неуправляемых и неконтролируемых факторов, дрейфа системы, т.е. в реальных условиях эксплуатации системы и наличия всевозможных помех.

Сочетание физических и информационных принципов на практике означает интеллектуализацию известных систем, в частности создание интеллектуальных средств измерений. Объединение физических и информационных принципов в единую интегральную систему позволяет принципиально по новому решать старые проблемы.

Это отмечает акад. А.А. Самарский "...используя измерительный прибор среднего качества в сочетании с компьютером, можно на основе специального алгоритма получать результаты, которые дал бы измерительный прибор очень высокого качества" [59, с. 4].

Развитие высокоточных технологических и измерительных систем приборостроения невозможно без использования информационных технологий, так как их сочетание "...в ряде случаев позволяет освободиться от ограничений, продиктованных самой природой явления, то есть выйти за пределы, которые могут быть достигнуты любым, сколь угодно совершенным прибором" [17, с. 25].

Примером существенного повышения точности при взвешивании на цифровых весах (в пределах 0—100 кгс) является моделирование влияния "мешающих" влияний — температуры внешней среды и изменения напряжения автономного источника питания емкостного датчика весов [294, с. 26—28]. Первоначальная модель была принята линейной; средняя относительная погрешность составляла 0,5 %.

Анализ полученной многофакторной математической модели показал, что учитываются статистически значимые эффекты: нелинейный характер датчика силы, температура внешней среды, изменение напряжения источников питания, а также взаимосвязанный характер влияния (взаимодействия факторов) температуры внешней среды — напряжения питания прибора и температуры внешней среды — полезной нагрузки.

Учет в математической модели различных функционально-систематических погрешностей позволил уменьшить среднюю погрешность измерений в 16 раз, а среднюю квадратическую погрешность в 11 раз [294, с. 27].

В области высокоточной обработки и измерений реальные системы не могут повысить точность в несколько раз без увеличения существенных людских, временных, финансовых ресурсов для поиска новых физических эффектов, создания специальных технологических и метрологических условий и других высокочрезвычайных действий. Информационная коррекция возникающих функционально-систематических погрешностей позволяет существенно — в 3–10 раз повысить точность обработки и измерений со значительно меньшими затратами.

Анализ предложенного метода показал, что существенные результаты достигаются за счет свертывания технологической (или измерительной) системы в рабочий орган — собственно режущий инструмент или измерительное устройство в виде датчиков первичной измерительной информации.

Значительные области применения предлагаемого подхода возможны в связи с увеличением производства интеллектуальных датчиков [295, 296] и использованием искусственных спутников Земли для регистрации сигналов датчиков и ретрансляции в соответствующие наземные центры для принятия необходимых действий по контролю параметров в энергетике; трубопроводном транспорте жидкостей, газов; состояния почвы в сельскохозяйственных районах; прогнозирования состояния воды, почвы в лесных районах и т.д. [297].

7.6 Многофакторное математическое моделирование высоковольтной термонапряженной изоляции термоаппаратов [232, 252]

Полимерные материалы широко используются в качестве электроизоляции, однако единой методики ее проектирования не существует [298]. В [299, 300] показана возможность крайне неравномерного распределения напряженности электрического поля в пронизываемой потоком тепла электроизоляции между плоскими и коаксиальными электродами. Вопрос об одновременном учете геометрических, электро- и теплофизических факторов, а также мощности теплового потока и уровня напряжения при создании современной полимерной электроизоляции изучен недостаточно, особенно в динамических режимах. Цель настоящей работы заключалась в разработке физически не противоречивой математической модели термонапряженной изоляции (ТНИ) для определения оптимальных и предельных условий ее эксплуатации, обоснованного выбора материалов и требований к ним.

Конкретные исследования были проведены для ТНИ между обмотками последнего каскада высоковольтного трансформаторно-выпрямительного модуля (ВТВМ), у которого к ферритовому магнитопроводу плотно прилегает первичная обмотка. Для анализа всю конструкцию удобно представить в

виде имеющих номера $k = 0, 1, 2, \dots, z$ коаксиальных слоев толщиной ΔR , в пределах которых параметры материалов и характеристики процессов процессов неизменны, а удаление слоя от оси равно $R_k = k\Delta R$.

При оптимизации ТНИ рассматривают следующие факторы, имеющие существенное влияние на распределение в ней температуры и напряженности электрического поля:

d_n — толщина изоляции, м;

γ_n — электрическая проводимость изоляции, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$;

R_a — радиус внутреннего тепловыделяющего электрода, м;

ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость;

χ_n, χ_z — коэффициент теплопроводности изоляции и внутреннего электрода соответственно, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$;

ρ_0 — объемная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^3$;

α_T — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2$;

$T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды, К.

Как правило, с ростом температуры изоляции T_n наблюдается значительное увеличение γ_n , что достаточно точно аппроксимируется полученным на основе экспериментальных данных выражением:

$$\lg \gamma_n = a\eta^{T-b} + \lg \gamma_{0n}, \quad (7.1)$$

где $a = 0,35$; $b = 223 \text{ К}$; $\gamma_{0n} = 10^{-15}$; $\eta = 1,0138 - 1,0225$ (эмпирические значения) для различных полимерных материалов при $T = 253 - 353 \text{ К}$.

Допустимая для изоляции напряженность $E_{\text{доп}}$ электрического поля принята равной наименьшему значению электрической прочности $E_{\text{пр}}$, найденной экспериментально для каждого значения температуры. В режиме нестационарной теплопроводности при разогреве электрически нагруженного диэлектрика амплитуда E_m напряженности электрического поля не должна превышать $E_{\text{доп}}$ при соответствующей температуре в различных точках ТНИ (для различных R). Разность $\Delta E = E_{\text{доп}} - E_m$ наиболее информативна в оценке работоспособности ТНИ, так как в локальных объемах изоляции временно может возникнуть напряженность электрического поля намного большая, чем в стационарном режиме.

Достаточно трудоемкая процедура оптимизации ТНИ сводилась к тому, чтобы при каждом сочетании варьируемых значений факторов $d_n, \gamma_n, R_a, \epsilon_r, \chi_n, \chi_z, \rho_0, \alpha_T, T_{\text{окр}}$ выполнить полный расчет по программе TERMA, для различных R определить максимальную температуру T_{max} , E_m и сравнить их с допустимыми.

Применение статистических многофакторных моделей [301] значительно эффективней. Поэтому значения ΔE в слоях изоляции возле электродов, в среднем слое и в промежуточных приняты для таких моделей в качестве функций отклика: $\hat{y}_1 = \Delta E_1 = \Delta E(R = R_a + \Delta R/2)$; $\hat{y}_2 = \Delta E_2 = \Delta E(R_a + 2\Delta R)$; $\hat{y}_3 = \Delta E_3 = \Delta E(R_a + 0,5d_n)$; $\hat{y}_4 = \Delta E_4 = \Delta E(R_z - 2\Delta R)$; $\hat{y}_5 = \Delta E_5 = \Delta E(R_z - \Delta R/2)$.

Кроме того, принято: $\hat{y}_6 = E_6 = E(R_2 - \Delta R / 2)$; $\hat{y}_7 = T_{\max}(R = R_B)$; $\hat{y}_8 = \Delta T = T_{\text{доп}} - T_{\max}(R = R_B)$; $\hat{y}_9 = \nabla T = (T_{k-1} - T_k) / \Delta R$, где $T_{\text{доп}}$ — допустимая для данного диэлектрика температура.

Для всех девяти моделей $\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_9$ указанные выше простые факторы сведены к четырем обобщенным факторам — электрофизическому X_1 , геометрическому X_2 , теплоотвода в наружную среду X_3 и теплофизическому X_4 .

Фактор X_1 связан с постоянной $\tau = \epsilon_0 \epsilon_r / \gamma_n$ релаксации зарядов в изоляции, а его вид $X_1 = -\lg(\tau \gamma_0 / \epsilon_0) = a \eta^\theta - \lg \epsilon_r$ — с аппроксимирующей функцией согласно (7.1). Для применяемых диэлектриков $X_1 = 0,301 - 1,082$ (рис. 7.5).

Соотношение $X_2 = R_B \ln [(R_B + d_n) / R_B]$ выбрано как применяющееся для Лапласова поля между коаксиальными электродами [302], и при $R_B = 10 - 12$ мм, $d_n = 4 - 10$ мм оно лежит в диапазоне 3,452 — 7,274 мм (рис. 7.6).

Условия эксплуатации ВТВМ предусматривают его обдув при $T_{\text{окр}} = 273 - 313$ К и скорости охлаждающего воздуха $v_s = 4 - 12$ м/с. Учитывая $\alpha_r = 5,6 + 4v_s$, получаем, что $X_3 = \alpha_r T_{\text{окр}} \cdot 10^{-3} = 5,897 - 16,777$ Вт/м² (рис. 7.7).

Для обобщения теплофизических параметров удобно тепловыделение в феррите радиусом R_ϕ и обмотке толщиной $d_{\text{об}} = R_B - R_\phi$ отнести только к обмотке. Тепло, выделяющееся в отрезке конструкции длиной l , передается изоляции только в радиальном направлении в виде теплового потока поверхностной плотностью h_n , поэтому $\rho_0 \pi (R_B^2 - R_\phi^2) l = 2\pi R_B l h_n$.

Для рассматриваемых конструкций ВТВМ

$$h_n = 0,5 \rho_0 (R_B + R_\phi) (R_B - R_\phi) / R_B = 0,875 \rho_0 \kappa \Delta R,$$

где $\kappa = (R_B - R_\phi) / \Delta R$.

С другой стороны, из соотношения

$$\chi_{j-1} \nabla T|^{j-1} = \chi_j \nabla T|_j,$$

выражающего непрерывность теплового потока на границе j -го и $(j-1)$ -го элементов конструкции, для точки m на границе раздела внутреннего электрода и изоляции

$$h_n = -\chi_\varepsilon \left. \frac{dT}{dR} \right|_\varepsilon; \quad h_n = -\chi_{\text{и}} \left. \frac{dT}{dR} \right|_{\text{и}}.$$

Тогда:

$$\left. \frac{dT}{dR} \right|_{\text{и}} - \left. \frac{dT}{dR} \right|_\varepsilon = h_n (1/\chi_\varepsilon - 1/\chi_{\text{и}}) = 0,875 \rho_0 \kappa \Delta R (\chi_{\text{и}} - \chi_\varepsilon) / (\chi_{\text{и}} \chi_\varepsilon).$$

Разделив последнее выражение на $-\kappa \Delta R \cdot 10^5$, получаем обобщенный теплофизический фактор

$$X_4 = (-10^{-5}/\kappa) \frac{d^2T}{dR^2} = -0,875p_0(\chi_{II} - \chi_{\Sigma})/(\chi_{II} \chi_{\Sigma}) \cdot 10^{-5},$$

который для рассматриваемых условий равен 3,428–8,085 К/м² (рис. 7.8).

Обоснование плана многофакторных моделей ТНИ. Для получения моделей выбран равномерный симметричный многофакторный регулярный план типа 3⁴//27 (табл. 7.6). Теоретическая информационная эффективность извлечения полезной информации из результатов экспериментов для модели главных эффектов в этом плане составляет 100 %. Существенно, что план является робастным, т.е. он устойчив по отношению к выбору конкретной структуры уравнения регрессии, а также, что он обеспечивает квази-D-оптимальность практически любой модели, построенной по результатам эксперимента. Максимальный коэффициент парной корреляции между любыми эффектами по всем полученным девяти моделям не превышал 0,36, что позволяет устойчиво оценивать коэффициенты этих моделей.

Разработка математических моделей и анализ их статистических характеристик проводились с помощью ПС ПРИАМ. Полученные математические модели имеют вид

$$\hat{y}_1 = 15,347 - 5,251x_4 - 3,890x_3 - 3,102x_2 + 2,336x_1 + 1,274x_3x_4 - 1,268z_3 + 1,106x_1x_4 + 0,905z_4 + 0,872x_2z_4 + 0,803x_1x_2,$$

$$\hat{y}_2 = 17,641 - 4,748x_4 - 3,925x_3 - 3,226x_2 - 1,629z_3 + 0,992x_3x_4 + 1,496x_1 + 1,180x_1x_2 + 1,136x_1x_4 + 1,171z_4 + 0,871z_1z_2x_3 + 0,579z_1x_3,$$

$$\hat{y}_3 = 20,619 - 4,733x_4 - 4,719x_3 - 1,557x_2 - 1,358z_3 + 1,264x_3x_4 + 0,536z_4,$$

$$\hat{y}_4 = 22,604 - 5,666x_3 - 5,313x_4 - 2,285x_1 - 1,459z_3 - 1,562x_1x_4 - 1,615x_1x_3 - 0,671z_1x_2z_3 - 1,052z_1 + 0,30x_2x_3z_4,$$

$$\hat{y}_5 = 23,592 - 6,723x_3 - 4,550x_4 + 2,181z_2x_3x_4 + 2,130z_2z_3x_4 + 2,021z_2x_4 - 2,441x_1x_3x_4 - 1,611z_3 - 1,025x_2x_3z_4 - 2,030x_1z_4 + 1,420z_1x_2x_3 + 1,670x_2z_3x_4 - 1,157x_1x_3,$$

$$\hat{y}_6 = 10,921 - 2,320z_2x_3x_4 + 2,737x_1x_4 + 1,530x_4 + 1,879x_1 - 1,690x_1z_2x_4 - 1,911z_2x_4 + 0,631x_1x_2x_4 + 0,855x_1x_2 - 1,237x_1z_2z_3 + 1,222z_2z_4 - 0,784z_2 + 1,034x_3 + 0,575x_2 + 0,702x_3x_4 - 0,887x_1z_3 + 0,650x_2x_3z_4,$$

$$\hat{y}_7 = 331,724 + 9,689x_4,$$

$$\hat{y}_8 = 11,274 - 9,689x_4 - 7,581x_3 - 4,983x_2 - 1,923z_3 + 1,879x_3x_4 - 1,470x_2x_4 + 1,093z_4,$$

$$\hat{y}_9 = 1,940 + 0,539x_4 + 0,065x_1z_2x_4 + 0,057z_2x_3x_4 - 0,059x_1x_4 + 0,001x_1x_2z_3 - 0,050x_1x_3x_4 + 0,063z_2x_4 - 0,058x_3x_4 - 0,050z_4,$$

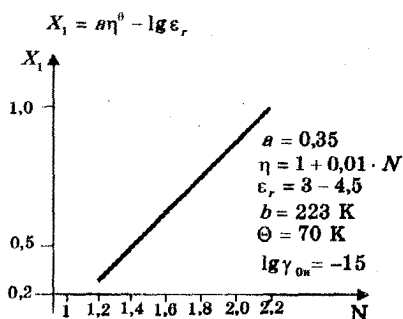


Рис. 7.5. Схема формализации сложного электрофизического фактора X_1

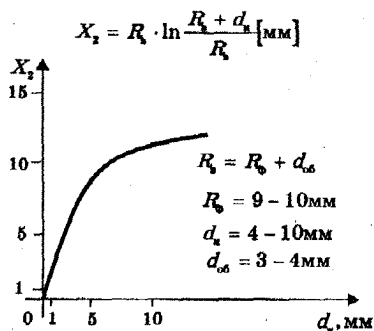


Рис. 7.6. Схема формализации сложного геометрического фактора X_2

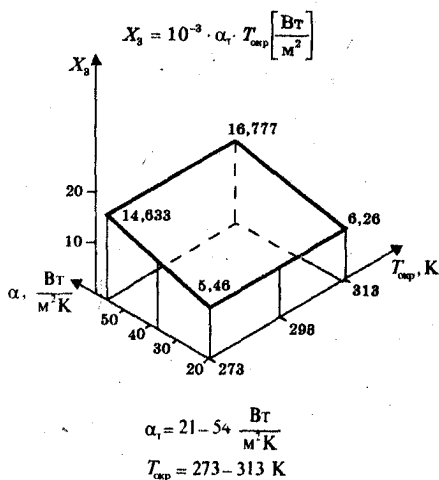


Рис. 7.7. Схема формализации сложного фактора теплоотдачи X_3

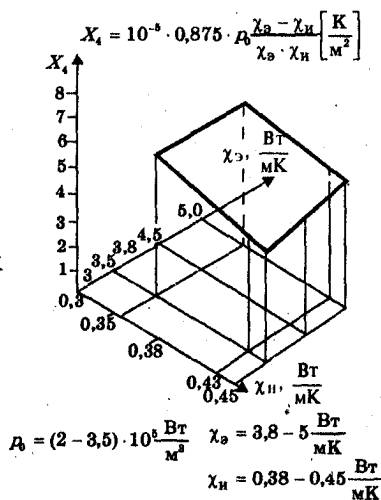


Рис. 7.8. Схема формализации сложного теплофизического фактора X_4

Таблица 7.6 Рабочая матрица, уровни варьирования, результаты исходных вычислений и расчета по модели.

№ п/п	Кодированные значения варьированных уровней факторов	Факторы				Функции				
		Натуральные обозначения факторов				Натуральные обозначения функций				
		-	-	-	-	ΔE_1		ΔE_2		
		Обозначения сложных факторов				Кодированные обозначения функций				
1	$F_1 \dots F_4$	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1		Y_2		
2	0	0,301	3,452	5,897	3,428	Результаты исход. вычисл. и предсказан. по моделям				
3	1	0,592	6,130	6,130	4,957					
4	2	1,082	7,274	6,777	8,085	y_1	\hat{y}_1	y_2	\hat{y}_2	
5	Результаты исходных вычислений	1	0,301	3,452	5,897	3,428	30,67	30,14	32,80	33,37
6		2	0,592	3,452	5,897	4,957	24,79	25,31	27,40	27,17
7		3	1,082	3,452	5,897	8,085	18,23	17,65	19,06	19,36
8		4	0,301	6,130	5,897	4,957	18,53	15,76	21,74	19,03
9		5	0,592	6,130	5,897	8,085	6,22	8,70	10,34	10,94
10		6	1,082	6,130	5,897	3,428	27,31	28,25	29,21	28,77
11		7	0,301	7,274	5,897	8,085	2,90	2,45	3,95	4,19
12		8	0,592	7,274	5,897	3,428	25,07	24,35	25,74	27,28
13		9	1,082	7,274	5,897	4,957	18,18	18,98	19,98	20,08
14		10	0,301	3,452	11,017	4,957	21,59	22,31	24,80	24,61
15		11	0,592	3,452	11,017	8,085	14,99	13,72	19,2	18,38
16		12	1,082	3,452	11,017	3,428	26,57	27,01	28,56	28,94
17		13	0,301	6,130	11,017	8,085	5,97	5,25	9,96	9,48
18		14	0,592	6,130	11,017	3,428	21,73	22,80	24,54	25,12
19		15	1,082	6,130	11,017	4,957	19,27	19,16	20,09	20,86
20		16	0,301	7,274	11,017	3,428	19,46	19,25	22,53	21,26
21		17	0,592	7,274	11,017	4,957	12,02	12,49	15,61	16,09
22		18	1,082	7,274	11,017	8,085	13,34	13,94	15,90	16,44
23		19	0,301	3,452	16,777	8,085	6,52	5,79	10,80	11,31
24		20	0,592	3,452	16,777	3,428	16,35	17,47	19,10	19,48
25		21	1,082	3,452	16,777	4,957	17,22	16,47	15,90	15,43
26		22	0,301	6,130	16,777	3,428	11,54	12,09	14,15	14,04
27		23	0,592	6,130	16,777	4,957	5,80	7,55	9,11	10,73
28		24	1,082	6,130	16,777	8,085	10,37	9,65	11,8	10,52
29		25	0,301	7,274	16,777	4,957	2,72	1,77	5,96	6,56
30		26	0,592	7,274	16,777	8,085	-0,98	1,41	0,42	0,81
31		27	1,082	7,274	16,777	3,428	17,30	14,63	17,69	16,23

Продолжение таблицы 7.6

№ п/п	Кодированные значения варьируемых уровней факторов	Функции								
		Натуральные обозначения функций								
		ΔE_3		ΔE_4		ΔE_5		E_6		
		Кодированные обозначения функций								
1	$F_1 \dots F_4$	Y_3		Y_4		Y_5		Y_6		
2	0	Результаты исходных вычислений и предсказанные по								
3	1	моделям								
4	2	Y_3	\hat{Y}_3	Y_4	\hat{Y}_4	Y_5	\hat{Y}_5	Y_6	\hat{Y}_6	
5	Ре-	1	33,49	34,52	33,99	33,43	35,05	36,65	8,95	8,67
6	зульт-	2	28,29	28,34	28,98	28,41	30,61	30,91	8,99	9,25
7	таты	3	19,47	19,25	20,42	18,41	27,73	26,50	11,07	11,37
8	ис-	4	26,20	25,74	29,62	29,06	30,64	29,69	8,56	9,43
9	ход-	5	16,54	16,64	22,14	23,25	24,13	23,46	8,67	8,30
10	ных	6	32,36	31,92	34,36	34,76	35,35	36,98	8,65	7,89
11	вы-	7	14,88	15,53	21,41	22,05	24,48	23,54	8,32	7,83
12	чис-	8	31,69	30,81	35,01	34,93	35,71	36,46	8,29	8,45
13	лений	9	24,47	24,63	28,87	30,49	30,39	29,90	9,21	9,41
14		10	25,49	25,45	26,58	26,25	27,81	26,22	8,99	9,17
15		11	20,26	18,70	21,74	22,00	23,76	24,13	9,04	9,16
16		12	29,22	30,47	29,66	28,71	30,83	30,85	9,17	9,35
17		13	16,39	16,09	22,02	21,93	24,25	23,87	8,58	8,71
18		14	27,79	27,87	30,42	31,74	31,43	29,85	8,57	9,21
19		15	22,37	22,84	25,60	23,69	26,46	27,97	10,34	9,92
20		16	27,29	26,76	31,02	31,09	31,72	32,42	8,28	7,86
21		17	22,06	21,73	27,38	26,92	28,41	28,31	8,39	8,00
22		18	14,02	14,98	10,03	12,12	11,05	12,11	21,35	21,54
23		19	11,88	11,95	13,37	13,50	15,34	17,25	8,97	8,90
24		20	19,87	19,79	20,55	20,08	21,80	22,02	9,00	8,40
25		21	15,43	16,06	14,38	12,65	13,80	11,38	14,20	14,11
26		22	17,99	17,19	21,12	22,40	22,30	23,35	8,50	7,70
27		23	13,80	13,45	17,67	18,03	19,25	17,40	8,75	9,84
28		24	11,42	9,35	-2,13	-1,43	-15,14	-13,57	39,04	38,67
29		25	12,48	12,34	18,09	17,50	19,65	16,93	8,35	8,76
30		26	5,88	8,24	12,84	11,37	15,03	16,07	9,37	9,25
31		27	15,69	16,07	15,17	16,96	15,14	16,35	15,26	15,74

Окончание таблицы 7.6

№ п/ п	Кодиро- ванные значения варьиру- емых уровней факторов	Функции						
		Натуральные обозначения функций						
		T_{max}		ΔT		∇T		
		Кодированные обозначения функций						
1	$F_1 \dots F_4$	Y_7		Y_8		Y_9		
2	0	Результаты исходных вычислений и предсказанные по						
3	1	моделям						
4	2	Y_7	\hat{Y}_7	Y_8	\hat{Y}_8	Y_9	\hat{Y}_9	
5	Ре-	1	305,0	321,42	38,00	37,28	1,32	1,28
6	зульт-	2	316,6	329,06	26,40	26,90	1,86	1,84
7	таты	3	330,9	344,70	12,10	12,84	2,74	2,78
8	ис-	4	324,1	329,06	18,9	19,24	1,86	1,81
9	ход-	5	341,8	344,70	1,20	1,22	2,73	2,76
10	ных	6	310,4	321,42	32,60	31,57	1,32	1,36
11	вы-	7	347,0	344,70	-4,00	-3,74	2,72	2,63
12	чис-	8	313,0	321,42	30,00	29,12	1,31	1,26
13	лений	9	327,8	329,06	15,20	15,97	1,85	1,82
14		10	321,2	329,06	21,80	21,72	1,86	1,84
15		11	330,9	344,70	12,10	11,16	2,74	2,68
16		12	313,7	321,42	29,30	30,40	1,32	1,33
17		13	342,0	344,70	1,00	-0,46	2,73	2,75
18		14	319,0	321,42	24,00	24,69	1,32	1,37
19		15	328,9	329,06	14,10	14,07	1,87	1,94
20		16	321,7	321,42	21,30	22,24	1,32	1,26
21		17	332,6	329,06	10,40	10,80	1,86	1,84
22		18	347,8	344,70	-4,80	-5,42	2,74	2,73
23		19	342,8	344,70	0,20	0,60	2,74	2,76
24		20	329,1	321,42	13,90	13,99	1,32	1,32
25		21	335,1	329,06	7,90	7,23	1,87	1,90
26		22	334,4	321,42	8,60	8,27	1,32	1,34
27		23	342,6	329,06	0,40	-0,43	1,86	1,92
28		24	355,2	344,70	-12,20	-11,02	1,87	1,92
29		25	346,3	329,06	-3,30	-3,70	1,86	1,83
30		26	359,4	344,70	-16,40	-15,99	2,73	2,73
31		27	337,3	321,42	5,70	5,83	1,33	1,34

где $x_1 = 2,360(X_1 - 0,658)$; $z_1 = 1,929(x_1^2 - 0,228x_1 - 0,579)$;
 $x_2 = 0,615(X_2 - 5,619)$; $z_2 = 2,422(x_2^2 - 0,330x_2 - 0,546)$;
 $x_3 = 0,180(X_3 - 11,230)$; $z_3 = 1,567(x_3^2 - 0,058x_3 - 0,642)$;
 $x_4 = 0,385(X_4 - 5,490)$; $z_4 = 2,195(x_4^2 - 0,293x_4 - 0,558)$.

В качестве среднеквадратичных ошибок была условно принята величина $s_{y_j} = 0,03 \bar{y}_j$ (\bar{y}_j — среднее значение результатов вычислений исходных данных). Проверка гипотезы об адекватности моделей показала, что при принятом значении среднеквадратичных ошибок адекватность моделей следует считать удовлетворительной (табл. 7.7).

Таблица 7.7 Результаты статистического анализа математических моделей

Параметры статистического анализа	Условное обозн.	Значения параметров для модели \hat{y}_j				
		\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3	\hat{y}_4	\hat{y}_5
Условные дисперсия и среднеквадратичная погрешность	$s_{y_j}^2$	0,2121	0,2801	0,3827	0,4598	0,5010
	s_{y_j}	0,4605	0,5292	0,6186	0,6781	0,7078
Число обусловленности	<i>cond 1</i>	1,00	2,39	1,00	4,72	5,19
Отношение максим. собственного числа к минимальному	<i>cond 2</i>	1,00	3,59	1,00	3,87	4,84
Проверка гипотезы об адекватности полученной математической модели	$s_{ад}^2$	2,6071	1,5356	0,9796	1,8646	3,2527
	$F_{расч}$	12,29	5,40	2,56	4,06	6,49
	$F_{табл}$	1,64	1,67	1,57	1,62	1,69
	$f_{ад}$	16	15	20	17	14
	α			0,05		
Величина и значимость коэффициента множественной корреляции	R	0,9884	0,9932	0,9929	0,9917	0,9919
	f_R'	10	11	6	9	12
	f_R	16	15	20	17	14
	$F_{расч}$	67,5	99,9	233,5	112,1	70,9
	$F_{табл}$	3,69	3,73	3,87	3,68	3,8
	α			0,01		
Средн. погрешность аппроксимации	$\varepsilon_{\bar{y}}$	9,33*)	8,0	4,3	5,7	5,3
Доля рассеивания, объясняемая моделью	$Q_{\hat{y}}$	0,9769	0,9865	0,9859	0,9834	0,9838

*) Без учета одного результата опыта вблизи нуля значений \bar{y}_1 .

Окончание таблицы 7.7

Параметры статистического анализа	Условное обозн.	Значения параметров для модели \hat{y}_j			
		\hat{y}_6	\hat{y}_7	\hat{y}_8	\hat{y}_9
Условные дисперсия и среднеквадратичная погрешность	$s_{y_j}^2$	0,1073	99,0378	0,1144	0,00340
	s_{y_j}	0,3276	9,9518	0,3382	0,0583
Число обусловленности	<i>cond</i> 1	9,64	1,00	1,00	4,42
Отношение масим. собственного числа к минимальному	<i>cond</i> 2	8,28	1,00	1,00	5,99
Проверка гипотезы об адекватности полученной математической модели	$s_{ад}^2$	0,5812	100,85	0,6945	0,00256
	$F_{расч}$	5,42	1,02	6,07	0,75
	$F_{табл}$	1,83	1,51	1,59	1,62
	$f_{ад}$	10	25	19	17
	α	0,05			
Величина и значимость коэффициента множественной корреляции	R	0,9972	0,7080	0,9987	0,9975
	f_k'	16	1	7	9
	f_R	10	25	19	17
	$F_{расч}$	110,2	25,1	1036,6	370,4
	$F_{табл}$	4,5	7,8	3,8	3,7
	α	0,01			
Средн. погрешность аппроксимации	$\varepsilon_{\bar{y}}$	4,1	2,4	4,44**)	1,9
Доля рассеивания, объясняемая моделью	$Q_{\hat{y}}$	0,9944	0,5013	0,9974	0,9949

***) Без учета трех результатов опытов вблизи нуля значений \bar{y}_8 .

Информативность математических моделей (кроме модели \hat{y}_7) высокая: множественный коэффициент корреляции изменяется в пределах 0,9884—0,9987. Статистическая значимость коэффициента множественной корреляции также высокая.

Средняя погрешность аппроксимации составила от 1,9 % до 9,3 %. Доля рассеивания по результатам, объясняемая математической моделью, составляет 0,9769—0,9974, а для \hat{y}_7 — 0,5013.

Все математические модели высоковольтной ТНИ электрических аппаратов характеризуются весьма хорошей устойчивостью коэффициентов к

случайным составляющим первичных результатов: числа обусловленности для четырех моделей равны единице, а для остальных не превышают 9,64.

Вычислительный эксперимент с математическими моделями. Многофакторная оптимизация ТНИ была проведена с использованием метода случайного поиска и ЛПГ равномерно распределенных последовательностей. Для откликов должно выполняться условие $10 \leq (\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_3) \leq 15$; $\hat{y}_8 \rightarrow \max$ при различных значениях обобщенных факторов.

В первой задаче ($X_1 = 1,082$, $X_2 = 7,274$, $X_3 \rightarrow opt$, $X_4 \rightarrow opt$) получено: $\hat{y}_8 = 1,076$ при $X_3 = 16,992$ и $X_4 = 4,192$, т.е. при заданных и неизменных электрофизических и геометрических параметрах ТНИ оптимизацией ее теплофизических характеристик и условий теплоотдачи получены такие их значения, при которых максимальная рабочая температура в ТНИ всегда ниже допустимой не менее чем на 1,076 К, и при этом запас ΔE электрической прочности составляет 10–15 кВ/мм во всех точках изоляции.

Для $X_1 = 1,082$, $X_2 = 3,452$, $X_3 \rightarrow opt$, $X_4 \rightarrow opt$ наибольшее значение $\hat{y}_8 = 7,482$ получается при $X_3 = 16,565$ и $X_4 = 5,079$.

Для случая $X_1 = 1,082$, $X_2 = 3,452$, $X_3 \rightarrow opt$, $X_4 = 8,085$ оптимизация ТНИ приводит к $\hat{y}_8 = 6,273$ при $X_3 = 14,298$.

Выводы по решенному комплексу задач ТНИ.

1. Разработана обобщенная многофакторная математическая модель термонапряженной изоляции, учитывающая ряд параметров (геометрические размеры, электро- и теплофизические свойства диэлектрика, нестационарные условия и режимы эксплуатации), которые сведены к четырем обобщенным факторам. В качестве функций отклика приняты важнейшие характеристики ТНИ (запас электрической прочности, абсолютное значение напряженности электрического поля, максимальная температура в нагреваемой изоляции и др.), определяющие ее работоспособность.

2. Использование при моделировании функций отклика симметричного регулярного плана типа $3^4/27$ обеспечило устойчивость к выбору структуры многофакторного уравнения регрессии и квази-D-оптимальность всех полученных моделей.

3. На основе этих полиномиальных моделей разработана инженерная методика выбора оптимальных сочетаний обобщенных факторов и рациональных режимов эксплуатации ТНИ.

4. Проведение вычислительного эксперимента позволило оптимизировать электроизоляционную конструкцию высоковольтного трансформаторно-выпрямительного модуля напряжением 100 кВ и показало высокую эффективность применения разработанной методики создания высоковольтной ТНИ.

7.7 Основные теоретические и прикладные результаты математического моделирования технологических систем

Не представляется возможным (из-за ограничения объема) привести изложение решения других задач многофакторного математического моделирования и многокритериальной оптимизации технологических и технических систем, решенных с помощью рассматриваемой наукоёмкой информационной технологии и ППП ПРИАМ. Перечислим названия наиболее интересных из них.

1. Математическое моделирование и оптимизация режимов обработки жаропрочных никелевых сплавов инструментами из сверхтвёрдых материалов [303, 304, 305, 306].
2. Математическое моделирование погрешностей взаимного расположения поверхностей сопряжения при роботизированной сборке многоэлементных конструкций [238, 239, 237, с. 33–38].
3. Математическое моделирование и оптимизация режимных технологических факторов при электроэрозионной прошивке отверстий в стали 1Х12СЮ [307].
4. Исследование влияния конструктивных и технологических факторов на прочность болтовых соединений из композиционных материалов типа углепластиков ("Композит-2") [246, ч.1, ч.6; 308, с. 93–96; 309].
5. Математическое моделирование системы кондиционирования воздуха самолета АН-3 [21, ч. 6].
6. Математическое моделирование и оптимизация технологического процесса антифрикционно-плосковершинного хонингования гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания СМД-60 [310].
7. Математическое моделирование и оптимизация режимов термической обработки Cu-Al-Mn сплавов с эффектом запоминания формы [311, с. 37–40].

Анализ проведенного прикладного математического моделирования реальных технологических систем подтвердил разработанные теоретические схемы формирования устойчивой структуры и устойчивого оценивания коэффициентов многофакторного уравнения регрессии для случая дробного факторного эксперимента. Полностью подтвердилась разработанная технология решения прикладных задач по построению многофакторных математических моделей, линейных относительно независимых параметров, позволяющая получать модели, отвечающие критериям теоретической информационной эффективности, семантической (информационной), устойчивости (корректности), адекватности, информативности, фактической эффективности извлечения полезной информации из исходных данных [312, 313, 233].

Глава 8 Эффективность практического применения стохастических моделей

8.1 Основные результаты работы с промышленностью, научно-исследовательскими институтами, вузами по внедрению современной методологии проведения экспериментальных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

В современном промышленном развитом обществе разнообразные технологии производства рассматриваются как прикладные науки, изучающие процессы получения продукции и создания потребительской стоимости (всего того, что необходимо человеку для удовлетворения его материальных или духовных потребностей).

Машинное промышленное производство возникло из ремесел и мануфактурного дела по причине роста потребности людей в сравнении с возможными способами ее удовлетворить уже известными способами, инструментами, приспособлениями. Роль технологии в переходе к промышленному производству была, по мнению К. Маркса, определяющей. "Вместе с уже совершенной революцией в производительных силах, — которая проявляется как революция технологическая, — наступает также и революция и в производственных отношениях" [314, с. 51]. Понимая значимость технологии для общества в приведенном смысле и учитывая, что потребление продукции увеличивается по объему, а главное, усложняется качественно, вплоть до появления ранее неизвестных ее видов и типов, мы неизбежно должны прийти к выводу о первостепенной важности совершенствования технологии производства для существования и развития любого общества, любой цивилизации.

Для создания и функционирования технологических и других систем необходимы разнообразные ресурсы: физические (необходимые), информационные (достаточные), системные (прогрессивные). *Физические ресурсы* — вещество, энергия, пространство, время — являются первичными, без которых никакая материальная действующая сложная система функционировать не может (рис. 8.1). Степень совершенства системы характеризуется необходимыми затратами физических ресурсов, отнесенных к единице производимой продукции или (в общем случае) к единице выполняемой функции (например, преодоления расстояния для транспортных средств, восприятия воздействий для материалов). Универсальным показателем потребления указанных ресурсов может быть себестоимость (C) единицы выполняемой функции. При $C \rightarrow \min$ потребление физических (Φ) ресурсов в обобщенном смысле будет $\Phi \rightarrow \min$.

Для реализации указанной задачи необходимы *информационные ресурсы* — кадровые, интеллектуальные, методологические, информационные

(рис. 8.1), которые являются "инструментом" для достижения поставленных перед сложной системой цели (целей) наилучшим (оптимальным) образом [315, 316]. Конкретными "инструментами" наилучших результатов могут быть эвристические методы решения изобретательских задач, многокритериальная оптимизация, многофакторное математическое моделирование сложных систем и др.

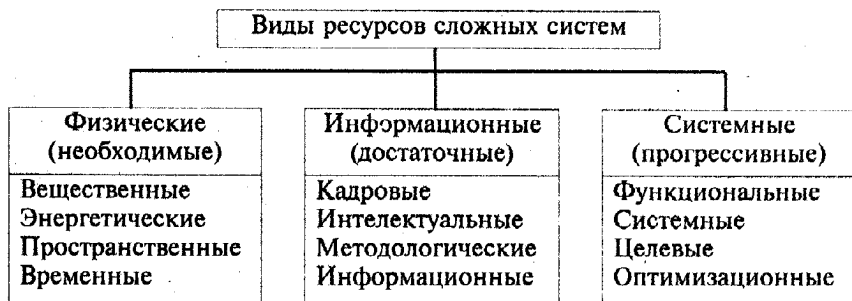


Рис. 8.1 Виды ресурсов сложных систем

Структура модели $\hat{Y}(\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_p) = f_j(\Phi, И, С)$ ресурсного обеспечения критериев качества технологической системы и выпускаемой продукции для эксперимента $2^3/8$ (присутствие ресурсов задается "1", а отсутствие "-1") определяется выражением

$$(1 + \Phi)(1 + И)(1 + С) = 1 + \Phi + И + С + \Phi И + \Phi С + И С + \Phi И С,$$

где:

$\hat{Y}(\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_p)$ – вектор эффективности функционирования технологической системы и качества выпускаемой ею продукции, $1 \leq j \leq p$;

1 – символ начала отсчета критерия качества;

Φ – необходимость (например, система станок – приспособление – инструмент – заготовка);

$И$ – достаточность (принципы, методология, алгоритмы, программное обеспечение);

$С$ – прогрессивность достижения поставленных целей (C_1, C_2, C_3 – последовательность развития технологической системы);

$\Phi И$ – оптимизация физических ресурсов, $\Phi \rightarrow \min$;

$\Phi С$ – минимизация Φ , $\Phi \rightarrow \min$ (идеальный конечный результат $\Phi \approx 0$);

$И С$ – создание $С$, т.е. $С > 0$; если $И \rightarrow \max$, то $С \rightarrow \max$;

$\Phi И С$ – синергичность создания и функционирования сложной системы,

$\hat{Y}(\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_p) \rightarrow opt.$

Анализ показывает, что наибольшее значение для развития технологического производства имеет необходимая (новая) информация, которая количественно (эволюционно) и качественно (скачкообразно) предоставляет фактическую возможность изменения потребительских свойств (качества) производимых изделий по различным критериям: производительности, себестоимости, надежности, функциональности (моторесурс, надежность, безопасность, габариты, удобство пользования и т.д.), экологичности и др. Именно полезная информация, а не использование дополнительного количества сырья, энергоносителей, необходимых площадей (объемов), людей позволяет проводить развитие производства не экстенсивно, за счет абсолютного увеличения, а интенсивно — путем улучшения удельных показателей производства и производимых изделий (товаров) [318, с. 183—188].

Новая полезная информация для преобразования производства в начальной форме проявляется в виде физических, химических, геометрических и др. эффектов, а затем "реализуется" как изобретения, новые технические (технологические) системы, которые (в свою очередь) описываются с помощью принципиальных схем (компоновочных, функциональных), чертежей, технологии производства, испытательных программ, инструкций по эксплуатации.

Наиболее удобной формой установления количественной связи между первопричинами (факторами) и следствиями (критериями качества) технологических систем и производимых ими изделий могут быть математические модели. С их помощью можно выбирать наилучшую принципиальную схему (компоновку) системы, определять оптимальные сочетания критериев качества системы и выполняемых ею функций — изготовление изделий, проведение измерений, восприятие воздействий (механических, температурных, акустических и других). Системный подход к математическому моделированию прикладных систем обуславливает выполнение требований многофакторности самих моделей, многокритериальности свойств системы и ее функций.

Огромное количество самых разнообразных систем и требований к ним, а также сложность и трудоемкость получения указанных моделей непосредственно человеком ставят задачу их автоматизированного синтеза. С помощью полученных математических моделей исследователь может воздействовать на изучаемую систему и выбрать необходимую меру ее изменения. Чем более требуется изменить свойства системы и качественно, и количественно для достижения поставленных целей, тем больше необходимо иметь для этого информации, в том числе и в виде математических моделей.

Так как к математическим моделям неизбежно предъявляются требования многофакторности, многокритериальности и другие критерии качества, то сам процесс получения моделей требует системного подхода: алгоритмов, эвристик, программного обеспечения, накопленной информации по применению самой технологии получения моделей и их использования. Моделирование технологических систем путем использования экспериментально-статис-

тического подхода требует материальных, временных, интеллектуальных затрат и для получения наилучшего решения само становится объектом оптимизации и системного подхода. Помимо формальных действий с использованием ЭВМ возникает необходимость принятия и неформальных решений.

Отметим, что современные технические, технологические и другие системы объединяют в себе разнообразные и разнородные по своим физическим, химическим и другим сущностям подсистемы, их отдельные узлы, элементы, детали. Взаимодействие в одной системе разнородных подсистем (например, в технологической системе станка, приспособления, инструмента, заготовки) создает разнообразие функциональных проявлений, следствий и ставит задачу наилучшего достижения поставленной цели (целей). Для обеспечения целесообразного функционирования таких систем и достижения поставленных целей необходим большой объем информации. Энтропия таких систем сравнительно мала (по сравнению с необходимой полезной информацией).

Примером сочетания разнородных подсистем в одной системе может служить принцип информационной коррекции функционально-систематических ошибок в технологических и измерительных системах. Здесь происходит непосредственное объединение информационного ресурса — многофакторной математической модели, датчиков первичной информации, микропроцессора — и традиционных физических ресурсов. Значительная "разнообразность" подсистем обеспечивает высокий уровень результатов.

Существенное повышение точности обработки измерений (разделы 7.1, 7.4, 7.5) означает уменьшение энтропии в работе технологической и измерительной систем. Однако для такого существенного повышения точности не нужно поддерживать стандартных метрологических условий проведения замеров, использовать станок или измерительный прибор более высокой точности. Поэтому обеспечивается значительный выигрыш в показателе себестоимость — точность обработки (измерения) и $C \rightarrow \min$.

Если в системе будут более однородные по своей физической, химической и другим сущностям подсистемы, то ее энтропия будет больше, чем ранее рассмотренной, и для обеспечения ее работы можно обойтись меньшим необходимым объемом информации.

Обеспечение одинаковых целей для указанных двух типов систем (например, количество выпущенных изделий, их функциональных возможностей и др.) потребует для первой системы больше информации, но меньше других ресурсов — времени, сырья, энергоносителей, персонала. Вторая же система, "экономив" на стоимости информации, в которую входят программное обеспечение, математические модели, оптимизированные конструкции и технологии, затратит больше *физических ресурсов* — временных, материальных, энергетических, людских. Практика решения задач показывает, что скрытые затраты физических ресурсов, которые могут быть экономлены, если использовать информационные ресурсы, составляют не менее

30 %. Использование только физических ресурсов, их увеличение для повышения выпуска продукции не изменяет удельных показателей затрат и не увеличивает степени идеальности системы. Из приведенного следует, что необходимая полезная информация позволяет сэкономить разнообразные физические ресурсы. При развитии технических и технологических систем потребляемые физические ресурсы, как правило, истощаются. Информационные же ресурсы при их многократном использовании не только не истощаются, но даже совершенствуются. Использование в необходимой степени информации при создании любых систем позволяет при выбранном принципе действия создать наилучшую (в многокритериальном смысле) систему, а привлечение математических моделей — прогнозировать ее поведение, автоматизировать управление и тем самым исключить человека, изучить механизмы происходящих явлений, оптимизировать систему.

Используемая в целях совершенствования существующих и создания принципиально новых технологических систем и технологических процессов информация показывает меру воздействия на материальные объекты, систему, ее подсистемы и увеличивает уровень сложности системы и степень ее организации для достижения поставленных перед системой целей. При увеличении энтропии технологической системы сложность и степень ее организации уменьшаются. С увеличением энтропии системы к своему возможному максимуму способность системы достигать поставленные перед ней цели стремится к минимально возможным проявлениям.

Для систем со значительным использованием информации характерен интенсивный способ функционирования, а для систем, не использующих новую информацию — экстенсивный. Сами же системы неизбежно эволюционно и скачкообразно развиваются от более простых по своей организации, структуре, принципу работы к более сложным. Такое развитие требует полезной (приводящей к цели) информации и системных ресурсов.

Анализ применения *информационных ресурсов* в промышленно развитых странах мира показывает, что уровень их использования неуклонно возрастает [3, 9, 11]. Эффективность информационных ресурсов весьма велика: прибыль от использования информации, информационной профилактики от 3 до 7500 раз превышает затраты на ее получение [6, 7, 8]. Прибыль экономики знаний и услуг в 15 раз превышает затраты на обучение [319].

Информационные ресурсы и современная методология совершенствования сложных систем позволяют разрабатывать еще более эффективные по сравнению с физическими и информационными — *системные ресурсы* (рис. 8.1). Среди них необходимо различать функциональные, системные, целевые, оптимизационные.

Функциональные ресурсы — частичное или полное совмещение выполнения двух и более функций сложной системы ее подсистемами, узлами, деталями, ранее не выполнявшими эти функции.

Использование информационных ресурсов позволяет таким образом изменить саму систему, что возникают системные ресурсы. Системные ресурсы могут проявляться двояко: как следствие взаимодействия входящих в систему подсистем, их элементов или условий функционирования (взаимодействия факторов) и как появление нового свойства, ранее не присущего системе, появившегося после изменения комплектности системы, ее структуры, перехода системы от моно- (единичная) к би- (объединение двух) и полисистемам (объединение нескольких систем) [320, с. 90–96]. Возможно свертывание системы по одному из путей: 1 — вытеснение части подсистем в надсистему; 2 — развитие подсистем в составе технической системы; 3 — свертывание технической системы в одну из подсистем; 4 — свертывание технической системы в идеальное вещество [321, с. 153–168; 322, с. 98–99].

Примером успешно проведенных работ по свертыванию подсистем технической системы в идеальное вещество является разработка многофакторных математических моделей для моделирования и оптимизации режимов термической обработки сплава Cu-Al-Mn с эффектом запоминания формы [311, с. 37–40]. По сравнению с общепринятой термической обработкой, предельная, полностью устранимая при свободном восстановлении формы деформация может быть повышена в 2 раза, реактивное напряжение в 1,9 раза, что существенно расширило возможности практического применения медных сплавов с эффектом запоминания формы и повысило надежность изготавливаемых из них изделий.

Криогенные сплавы системы Cu-Al-Mn и разработанная технология термической обработки были внедрены на одном из предприятий для изготовления термочувствительных элементов регуляторов расхода хладагента. Достигнутые при этом упрощение конструкции, уменьшение веса и габаритов изделий, повышение точности регулирования, надежности работы позволило получить экономический эффект в размере 35000 руб. в год (в 1987 г.) [323, с. 79–80]. Системные ресурсы позволяют приблизить систему к идеальной, т.е. к минимально возможным затратам физических ресурсов при необходимых критериях качества функционирования системы. Здесь проявляется общая закономерность эволюции систем создаваемых человеком: развитие всех систем идет в направлении увеличения степени идеальности. "Идеальная" техническая система — это система, в которой использование физических ресурсов существенно сокращено или они используются как даровые, а функция ее выполняется.

Целевые ресурсы — переформулирование цели (целей) сложной системы для их изменения; выработка более общей системной цели, которая включает две или несколько ранее сформулированных целей.

Оптимизационные ресурсы — системная оптимизация объекта, процесса, заключающаяся в поиске наилучших значений всех введенных в оптимизацию критериев качества ($p = 6–15$). В силу системного эффекта критериев качества — принципа Ле Шателье-Самуэльсона (раздел 2.5) — совместное

улучшение оптимизируемых критериев качества возможно на основе компромисса по Парето [234]. Системная оптимизация позволяет выбрать оптимальную структуру системы и оптимизировать ее конструкторские, технологические и эксплуатационные параметры.

Использование системных ресурсов — наиболее высокого уровня из трех видов ресурсов — в конечном счете экономит физические ресурсы или делает использование некоторых из них излишним. Формулировка конкретных системных ресурсов возможна только за счет применения информационных ресурсов.

Взаимодействие ресурсов в формировании критериев качества сложных систем и выпускаемой продукции показано на рис. 8.2.

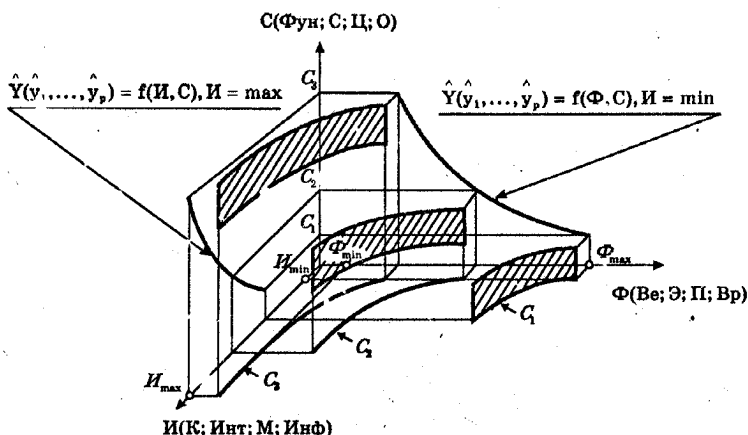


Рис. 8.2. Взаимодействие ресурсов в формировании критериев качества сложных систем и выпускаемой продукции

Совершенствование разнообразных создаваемых человеком систем возможно только путем использования научно-методологических разработок, которые представляются информационными и системными ресурсами. Эти виды ресурсов могут способствовать (быть инструментом) получению системных (интегральных) свойств, которых не было у элементов системы до включения их в нее. В явном виде это свойство систем было отмечено А.А. Богдановым в 1912 г.: система по сравнению с исходными ее частями (подсистемами) проявляет некоторые новые качества, которые в совокупности образуют сверхкачество, присущее системе. Такое свойство систем получило название эмергентность.

Зарубежные специалисты по анализу путей развития промышленно развитых стран мира отмечают, что главная гарантия народного благосостояния — не природные ресурсы страны, а степень ее интеграции в систему мировой экономики. Последнее возможно при высоком уровне используемых технологий, широком применении информационных и системных ресурсов, подготовке и переподготовке специалистов с применением изложенных научно-методологических разработок. Использование экспериментально-статистической методологии в высшей школе должно быть более реальным по отношению к специальным (профилирующим) дисциплинам; конкретным — на примерах прикладных исследований, выполненных читающими курсы преподавателями; системным — обсуждение центральных проблем в математических дисциплинах, основах научных исследований и технического творчества, специальных курсах по математическому моделированию и оптимизации сложных систем, выполнение курсовых и дипломных проектов, прикладных исследований.

Разработанные методы были внедрены в 19 организаций Украины и России.

ППП ПРИАМ был внедрен в 17 предприятий и организаций.

Изложенный цикл работ вошел составной частью в комплексную программу "Разработка научно-методических основ и создание прогрессивной высокопроизводительной базы автоматизации промышленного эксперимента", удостоенной Государственной премии Украины в области науки и техники 1994 года (Указ Президента Украины № 810/94 от 28 декабря 1994 г.).

8.2 Фактические основные полученные результаты: технологические, технические, экономические, методологические

Опыт применения разработанных методов, алгоритмического и программного обеспечения характеризуется следующими результатами.

1. При испытании агрегатов и узлов летательных аппаратов сокращается время испытаний на 30–80 %. Материальные и энергетические затраты снижаются на 20–70 %. Уменьшается на 20–40 % число рабочих и инженерно-технических работников, занятых в испытаниях, повышается надежность функционирования (сокращение отказов) в 1,5–5 раз, снижается себестоимость изготовления на 10–30 %, увеличивается ресурс работы в 1,5–3 раза, снижается полетный вес агрегатов и узлов на 1–8 % [324, с. 71].

2. Математическое моделирование и оптимизация технологического процесса антифрикционно-плосковершинного хонингования гильз цилиндров двигателя внутреннего сгорания (СМД-60) позволили повысить качество трущихся пар: на 00 км пробега двигателя расход топлива сократился на 0,5 л и масла на 30–40 куб. см. Ресурс работы деталей цилиндрико-поршневой группы повысился в 1,9–5 раз.

3. Оптимизация режимов обработки жаропрочных никелевых сплавов ЭП 741 НП и ЭП 539 ЛМ инструментов из поликристаллических сверхтвёрдых материалов позволила повысить производительность обработки (точения) в 6,6 раза, улучшить качество обработанной поверхности ($Ra < 1,25$) и снизить брак при точении дисков на 18 %.

4. Оптимизация технологического процесса вибрационной обработки деталей сложной формы в вязкопластичной среде по сравнению с ранее используемыми процессами позволила уменьшить окончательную шероховатость поверхностей обработки до $Ra = 6,3-3,2$ мкм (ранее $Ra = 10-8$ мкм), сократить время обработки при $Ra = 0,32$ мкм в 3,4-4,8 раза, уменьшить энергоёмкость процесса в 9-11 раз и технологическую себестоимость обработки в 10 раз, повысить производительность обработки в 4-8 раз [325, с. 54-55].

5. Внедрение пакета прикладных программ "Планирование, регрессия и анализ моделей" позволило уменьшить требуемое число опытов в 8-10 раз, автоматизировать процесс построения моделей, снизить затраты машинного времени в 8 раз и ручного труда при подготовке данных в 24 раза (по сравнению с пакетом для обработки статистических данных SSP).

6. Практика математического моделирования шестикомпонентных тензометрических систем и трехкомпонентных тензометрических весов показала, что можно выявить количественно влияние других факторов, нелинейности, взаимовлияния факторов; сократить время проведения опытов в 10-15 раз, материальные затраты, количество исполнителей при аттестации систем в 2-3 раза; повысить достоверность итоговых результатов и выводов. Учет в математической модели различных функционально-систематических погрешностей, нелинейности при моделировании цифровых весов позволил уменьшить среднюю погрешность измерений в 16 раз, а среднюю квадратичную погрешность в 11 раз.

7. Использование разработанного медного сплава Cu-Al-Mn с эффектом памяти формы в дроссельном терморегуляторе расхода хладагента позволило увеличить точность регулирования в 5-6 раз, уменьшить габаритные размеры и вес конструкций в 20 раз, т.е. фактически свернуть ранее используемую подсистему в рабочий орган посредством использования идеального вещества — сплава второго поколения с величиной восстанавливаемой при нагреве деформации 5-7 %.

Примеры аналогичных результатов можно было бы продолжить.

8. Разработки, начатые в 1971 г., с 1975 г. были внедрены в практику работ заводов, научно-производственных объединений, научно-исследовательских институтов, войсковых частей, высших учебных заведений. Экономическая эффективность от внедрений 20 законченных НИОКР и пакета прикладных программ "Планирование, регрессия и анализ моделей" составила 4842,5 тыс. руб. (на 1 июля 1989 г.).

Доля экономического эффекта по кафедре технологии машиностроения КПИ — 1112,1 тыс. руб. (или 23 %).

Общая сумма затрат на реализацию проведенных исследований равна 395 тыс. руб.

На один затраченный рубль было получено 2,82 руб. прибыли.

9. С 1972/73 учебного года и по 1992 г. (с перерывами) для аспирантов, соискателей, научных сотрудников был прочитан курс лекций "Теория планирования эксперимента" (лекций — 60 часов, практических занятий — 20 часов) [79].

Студентам специальности 0501 (12.01) — технология машиностроения были разработаны программы курсов и впервые прочитаны циклы лекций по дисциплинам "Основы научных исследований и технического творчества", "Математическое моделирование и оптимизация технологических систем" [326, 327].

Для слушателей факультета повышения квалификации преподавателей вузов была подготовлена программа и впервые прочитан цикл лекций по курсу "Оптимизация технологических процессов в машиностроении". Инженеры-технологи, обучающиеся специальности "Системы автоматизированного проектирования технологического назначения", впервые на факультете повышения квалификации прослушали лекции по курсу "Оптимизация технологических решений" [328].

10. С использованием разработанной методологии многофакторного математического моделирования были проведены экспериментальные исследования и получены многофакторные математические модели в диссертационных работах более 20 аспирантов, соискателей, адъюнктов.

11. Разработанные методы были доложены на научном семинаре (лекций — 28 часов, практических занятий — 10 часов, разработка программ проведения многофакторных экспериментальных исследований) в Научно-производственном объединении по технологии машиностроения для животноводства и кормопроизводства "РостНИИТМ", г. Ростов-на-Дону (1988 г.); прочитаны лекции по применению экспериментально-статистических методов в исследовании пластмасс во ВНИИМонтажспецстрой, г. Киев (1978—1982 гг.); прочитаны лекции и выполнены слушателями реальные выпускные работы по дисциплине "Математическая теория планирования эксперимента" в Центральном институте повышения квалификации кадров (Киевский филиал) Министерства авиационной промышленности СССР (1982—1983 гг.); прочитаны лекции по курсу "Теория планирования эксперимента" для аспирантов, соискателей и студентов технических специальностей Ферганского политехнического института (1983 г.); прочитан курс лекций (60 часов) "Экспериментально-статистические методы в НИОКР" для инженерно-технических работников производственного объединения "Завод Арсенал" (1979—1980 гг.); прочитан курс лекций и проведены активные методы обучения (62 часа) по курсу "Теория планирования эксперимента" для специалистов научно-иссле-

довательских лабораторий "УкрНИИпластмаш", г. Киев (1980 г.) и в других организациях.

12. Разработанная наукоемкая технология многофакторного математического моделирования сложных систем была предложена для комплексного использования и системного решения отраслевых проблем 10 организациям Украины и России. Рассмотренные основные результаты семнадцатилетнего опыта работы с промышленностью, научно-исследовательскими институтами, вузами показали, что статистический подход в различных областях техники и технологий дал существенный выигрыш по многим критериям качества, улучшил технические, технико-экономические и экономические показатели систем.

Полностью подтвердились оценки Н. Винера о проникновении статистического подхода почти во все разделы техники и необходимости признания статистической природы науки [329, с. 243, 247]. Полученные научные результаты полностью подтверждают его прогноз о том, что "компромисс между ошибками, связанными с неточностью данных, и ошибками, связанными с неустойчивостью методов, может быть найден только на основе статистических рассматриваний" и что статистические "соображения будут играть центральную роль и в технике будущего" [329, с. 247, 249].

Распространение и широкое использование разработанной методологии получения стохастических моделей, программного обеспечения, будет способствовать признанию в прикладных технических и технологических областях экспериментально-статистического подхода, эффективному и приемлемому по затратам решению разнообразных актуальных для производства задач, совершенствованию различных систем, их научному изучению, повышению качества выпускаемой продукции [330].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена крупная научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение: разработаны элементы теории создания стохастических многофакторных математических моделей для многокритериального моделирования структурных и параметрических связей условий функционирования и критериев качества реальных технических и технологических систем и процессов.

Стохастические математические модели позволяют моделировать информационные связи между исходными условиями и критериями качества технологических процессов механической обработки деталей и сборки изделий.

Получены следующие научные результаты.

1. Разработана и проверена на многочисленных реальных задачах технология моделирования структурных связей параметров технологических процессов механической обработки деталей и сборки изделий посредством получения семантических (в информационном смысле), адекватных, информативных, устойчивых и статистически эффективных математических моделей.
2. Разработана методология конструирования устойчивого (робастного) дробного факторного плана эксперимента для автоматизированного выбора структуры многофакторных стохастических математических моделей различных критериев качества технологических систем и выпускаемой ими продукции.
3. Впервые создан эффективный алгоритм формализованного определения структуры линейного относительно независимых параметров уравнения множественной регрессии, позволяющий получать семантические (в смысле механизмов происходящих явлений в моделируемых технологических системах) математические модели, отображающие необходимые, устойчивые структурные связи технологических параметров и показывающие закономерности формирования технологических, эксплуатационных, экономических критериев технологических процессов.
4. Впервые предложены алгоритмы устойчивого оценивания коэффициентов многофакторного уравнения регрессии в условиях взаимной сопряженности (мультиколлинеарности) факторов, позволяющие с минимально возможными ошибками определять значения коэффициентов получаемых математических моделей и, следовательно, наиболее точно получать информацию об изучаемых технологических системах и процессах.
5. Показано, что применение многофакторных математических моделей для решения многокритериальных задач сложных систем существенно уменьшает необходимые для конструирования и работы системы физические ресурсы — материальные, энергетические, пространственные, временные — тем самым совершенствует систему и создает системные ресур-

- сы, выражающиеся во вскрытии взаимодействий технологических параметров и их оптимизации, а также в свертывании технологической (или другой) системы в одну из подсистем (рабочий орган).
6. Впервые предложена, разработана и подтверждена решением реальных задач методология информационной коррекции поверхности отклика в факторном пространстве и поставленной цели для совершенствования технологических и других систем в тех ситуациях, когда повышение их критериев качества за счет физических (конструкторских, технологических) возможностей исчерпано или приводит к недопустимо высоким затратам. Полученная информация (информационный ресурс) в виде математических моделей формирует системный ресурс. Он выражается в изменении принципа достижения конечной цели не только за счет возможностей собственно технологической системы, но и за счет получения системной информации о ней и также о качестве выпускаемой ею продукции.
 7. Созданное программное средство "Планирование, регрессия и анализ моделей" позволяет реализовать сквозную автоматизированную технологию обработки данных в виде решения задач многокритериальной оптимизации, многофакторного математического моделирования, проведения вычислительного эксперимента.
 8. Полученные для различных критериев качества технологических, технических, измерительных, материаловедческих систем многофакторные математические модели позволяют системно решать задачи создания наилучших конструкций машин, приборов, инструментов; совершенствования и разработки технологий обработки деталей и сборки машин, проведения испытаний, оптимизации условий эксплуатации с получением комплекса возможных совместно наилучших критериев качества.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Использование ортогональных многочленов Чебышева в решении статистических и вычислительных задач

Ортогональные многочлены Чебышева находят широкое применение в дисперсионном, регрессионном и гармоническом анализах [331]; могут эффективно использоваться в теории планирования эксперимента [249, с. 21–22, 27–39; 332], при скоростном моделировании разложения функций путем преобразования в быстросходящийся полином (процесс экономизации) и в решении других задач [240, с. 257–272; 333, с. 238–248]. Такое широкое использование обеспечивается тем, что ортогональные многочлены Чебышева обладают пятью важными математическими свойствами [333, с. 238–239].

В целях упрощения и ускорения необходимых вычислений, значения коэффициентов ортогональных многочленов Чебышева табулируются [334, с. 100–102, 376–385]. Однако в таблицах, изданных на русском языке, верхняя степень полинома ограничена значением шесть, а формулы вычисления указаны в общем виде (без приведения их конкретных коэффициентов). Это затрудняет проведение вычислений особенно для задач с числом уровней факторов $s > 6$, при необходимости повышения точности аппроксимации как в детерминированном, так и в статистическом случаях.

Исходя из сказанного, представляется целесообразным привести формулы вычисления и преобразования к целым не сокращаемым значениям ортогональные многочлены Чебышева с числом уровней $s = 3–12$, степенями членов $p = 1–(s-1)$ и равными интервалами варьирования факторов. При использовании последнего условия достигается оптимальное расположение точек в одномерном случае с позиций критерия знания экстремальных значений аппроксимируемой неизвестной функции [234, с. 8–9] и предельно возможное упрощение для формул вычисления. Использование ортогональных многочленов Чебышева с числом уровней $s = 12$ и, следовательно, $p = 11$ позволяет в регрессионном анализе при аппроксимации результатов гарантировано учесть в математической модели $1 - 1/2^{10} > 0,999$ от исходного интервала изменения функции. Их можно использовать для высокоточного (прецизионного) моделирования и в случаях, когда число уровней качественных факторов велико.

Расчеты проведены по программе, составленной в НТУУ “КПИ”, в качестве алгоритма использовалась известная рекуррентная формула [331; 333, с. 239, (9.7)].

Ниже приведены:

1) $x^{(p)}[s]$ – преобразованные к целым не сокращаемым значениям ортогональные числа Чебышева (ортогональные контрасты);

2) $x^{(p)}$ — формулы вычисления, преобразованные к целым не сокращаемым значениям ортогональных чисел Чебышева (ортогональных контрастов) с точными значениями коэффициентов в простых дробях;

3) $x^{(p)}$ — формулы вычисления по пункту 2 со значениями коэффициентов в десятичных дробях и разрядностью 18.

Вычисление линейного (первой степени) полинома приведено в виде вычисления линейного контраста в [249, с. 27–29, 34–35].

Формулы вычисления и точные значения ортогональных многочленов Чебышева для планов с равными интервалами варьирования факторов $s = 3...12$, $p = 1...(s - 1)$

$$s = 3, p = 1$$

$$x^{(1)}[3] = -1, 0, 1$$

$$s = 3, p = 2$$

$$x^{(2)}[3] = 1, -2, 1$$

$$x^{(2)} = 3(x^2 - 2/3)$$

$$x^{(2)} = 3000000000000000000 \cdot 10^{-17} (-666666666666666667 \times 10^{-18} + x^2)$$

$$s = 4, p = 1$$

$$x^{(1)}[4] = -3, -1, 1, 3$$

$$s = 4, p = 2$$

$$x^{(2)}[4] = 1, -1, -1, 1$$

$$x^{(2)} = 1/4(-5 + x^2)$$

$$x^{(2)} = 2500000000000000000 \times 10^{-18} (-5 + x^2)$$

$$s = 4, p = 3$$

$$x^{(3)}[4] = -1, 3, -3, 1$$

$$x^{(3)} = 5/12(-41/5 \times x + x^3)$$

$$x^{(3)} = 416666666666666667 \times 10^{-18} (-820000000000000000 \times 10^{-17} \times x + x^3)$$

$$s = 5, p = 1$$

$$x^{(1)}[5] = -2, -1, 0, 1, 2$$

$$s = 5, p = 2$$

$$x^{(2)}[5] = 2, -1, -2, -1, 2$$

$$x^{(2)} = 1(-2 + x^2)$$

$$x^{(2)} = 1000000000000000000 \times 10^{-17} (-2 + x^2)$$

$$s = 5, p = 3$$

$$x^{(3)}[5] = -1, 2, 0, -2, 1$$

$$x^{(3)} = 5/6(-17/5 \times x + x^3)$$

$$s = 7, p = 4$$

$$x^{(4)}[7] = 3, -7, 1, 6, 1, -7, 3$$

$$x^{(4)} = 7/12(72/7 + (-67)/7 \times x^2 + x^4)$$

$$x^{(4)} = 5833333333333333333333333333 \times 10^{-18} (102857142857142857 \times 10^{-16} + (-957142857142857143 \times 10^{-17}) \times x^2 + x^4)$$

$$s = 7, p = 5$$

$$x^{(5)}[7] = -1, 4, -5, 0, 5, -4, 1$$

$$x^{(5)} = 7/20(524/21 \times x + (-35)/3 \times x^3 + x^5)$$

$$x^{(5)} = 3500000000000000000 \times 10^{-18} (249523809523809524 \times 10^{-16} \times x + (-116666666666666667 \times 10^{-16}) \times x^3 + x^5)$$

$$s = 7, p = 6$$

$$x^{(6)}[7] = 1, -6, 15, -20, 15, -6, 1$$

$$x^{(6)} = 77/60(-1200/77 + 434/11 \times x^2 + (-145)/11 \times x^4 + x^6)$$

$$x^{(6)} = 12833333333333333333333333333 \times 10^{-17} (-155844155844155844 \times 10^{-16} + 39454545454545454545 \times 10^{-16} \times x^2 + (-13181818181818181818 \times 10^{-16}) \times x^4 + x^6)$$

$$s = 8, p = 1$$

$$x^{(1)}[8] = -7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7$$

$$s = 8, p = 2$$

$$x^{(2)}[8] = 7, 1, -3, -5, -5, -3, 1, 7$$

$$x^{(2)} = 1/4(-21 + x^2)$$

$$x^{(2)} = 25000000000000000000 \times 10^{-18} (-21 + x^2)$$

$$s = 8, p = 3$$

$$x^{(3)}[8] = -7, 5, 7, 3, -3, -7, -5, 7$$

$$x^{(3)} = 1/12(-37 \times x + x^3)$$

$$x^{(3)} = 8333333333333333333333333333 \times 10^{-18} (-37 \times x + x^3)$$

$$s = 8, p = 4$$

$$x^{(4)}[8] = 7, -13, -3, 9, 9, -3, -13, 7$$

$$x^{(4)} = 7/192(297 + (-358)/7 \times x^2 + x^4)$$

$$x^{(4)} = 3645833333333333333333333333 \times 10^{-19} (297 + (-511428571428571429 \times 10^{-16}) \times x^2 + x^4)$$

$$s = 8, p = 5$$

$$x^{(5)}[8] = -7, 23, -17, -15, 15, 17, -23, 7$$

$$x^{(5)} = 7/320(15709/21 \times x + (-190)/3 \times x^3 + x^5)$$

$$x^{(5)} = 2187500000000000000 \times 10^{-19} (748047619047619048 \times 10^{-15} \times x + (-6333333333333333333333333333 \times 10^{-16}) \times x^3 + x^5)$$

$$s = 8, p = 6$$

$$x^{(6)}[8] = 1, -5, 9, -5, -5, 9, -5, 1$$

$$x^{(6)}=11/3840(-2925+13769/11 \times x^2+(-805)/11 \times x^4+x^6)$$

$$x^{(6)}=2864583333333333333 \times 10^{-20}(-2925+125172727272727273 \times 10^{-14} \times x^2+(-731818181818181818 \times 10^{-16}) \times x^4+x^6)$$

$$s=8, p=7$$

$$x^{(7)}[8]=-1, 7, -21, 35, -35, 21, -7, 1$$

$$x^{(7)}=143/26880(-1172307/143 \times x+242837/143 \times x^3+(-1043)/13 \times x^5+x^7)$$

$$x^{(7)}=531994047619047619 \times 10^{-20}(-819795104895104895 \times 10^{-14} \times x+169816083916083916 \times 10^{-14} \times x^3+(-802307692307692308 \times 10^{-16}) \times x^5+x^7)$$

$$s=9, p=1$$

$$x^{(1)}[9]=-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4$$

$$s=9, p=2$$

$$x^{(2)}[9]=28, 7, -8, -17, -20, -17, -8, 7, 28$$

$$x^{(2)}=3(-20/3+x^2)$$

$$x^{(2)}=3000000000000000000 \times 10^{-17}(-666666666666666667 \times 10^{-17}+x^2)$$

$$s=9, p=3$$

$$x^{(3)}[9]=-14, 7, 13, 9, 0, -9, -13, -7, 14$$

$$x^{(3)}=5/6(-59/5 \times x+x^3)$$

$$x^{(3)}=8333333333333333333 \times 10^{-18}(-1180000000000000000 \times 10^{-16} \times x+x^3)$$

$$s=9, p=4$$

$$x^{(4)}[9]=14, -21, -11, 9, 18, 9, -11, -21, 14$$

$$x^{(4)}=7/12(216/7+(-115)/7 \times x^2+x^4)$$

$$x^{(4)}=5833333333333333333 \times 10^{-18}(308571428571428571 \times 10^{-16}+(-164285714285714286 \times 10^{-16}) \times x^2+x^4)$$

$$s=9, p=5$$

$$x^{(5)}[9]=-4, 11, -4, -9, 0, 9, 4, -11, 4$$

$$x^{(5)}=3/20(716/9 \times x+(-185)/9 \times x^3+x^5)$$

$$x^{(5)}=1500000000000000000 \times 10^{-18}(79555555555555556 \times 10^{-16} \times x+(-20555555555555556 \times 10^{-16}) \times x^3+x^5)$$

$$s=9, p=6$$

$$x^{(6)}[9]=4, -17, 22, 1, -20, 1, 22, -17, 4$$

$$x^{(6)}=11/60(-1200/11+1514/11 \times x^2+(-265)/11 \times x^4+x^6)$$

$$x^{(6)}=1833333333333333333 \times 10^{-18}(-109090909090909091 \times 10^{-15}+1376363636363636 \times 10^{-15} \times x^2+(-2409090909090909 \times 10^{-16}) \times x^4+x^6)$$

$$s=9, p=7$$

$$x^{(7)}[9]=-1, 6, -14, 14, 0, -14, 14, -6, 1$$

$$x^{(7)}=143/1680(-47820/143 \times x+28007/143 \times x^3+(-350)/13 \times x^5+x^7)$$

$$x^{(7)}=851190476190476190 \times 10^{-19}(-334405594405594406 \times 10^{-15} \times x + 195853146853146853 \times 10^{-15} \times x^3 + (-269230769230769231 \times 10^{-16}) \times x \times x^5 + x^7)$$

$$s=9, p=8$$

$$x^{(8)}[9]=1, -8, 28, -56, 70, -56, 28, -8, 1$$

$$x^{(8)}=143/448(31360/143+(-1310788)/2145 \times x^2+9527/39 \times x^4+(-434)/15 \times x^6+x^8)$$

$$x^{(8)}=319196428571428571 \times 10^{-18}(219300699300699301 \times 10^{-15}+(-611089976689976690 \times 10^{-15}) \times x^2+244282051282051282 \times 10^{-15} \times x^4+(-28933333333333333 \times 10^{-16}) \times x^6+x^8)$$

$$s=10, p=1$$

$$x^{(1)}[10]=-9, -7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7, 9$$

$$s=10, p=2$$

$$x^{(2)}[10]=6, 2, -1, -3, -4, -4, -3, -1, 2, 6$$

$$x^{(2)}=1/8(-33+x^2)$$

$$x^{(2)}=12500000000000000 \times 10^{-18}(-33+x^2)$$

$$s=10, p=3$$

$$x^{(3)}[10]=-42, 14, 35, 31, 12, -12, -31, -35, -14, 42$$

$$x^{(3)}=5/24(-293/5 \times x+x^3)$$

$$x^{(3)}=208333333333333333 \times 10^{-18}(-58600000000000000 \times 10^{-16} \times x+x^3)$$

$$s=10, p=4$$

$$x^{(4)}[10]=18, -22, -17, 3, 18, 18, 3, -17, -22, 18$$

$$x^{(4)}=5/192(3861/5+(-82) \times x^2+x^4)$$

$$x^{(4)}=260416666666666667 \times 10^{-19}(77220000000000000 \times 10^{-15}+(-82) \times x^2+x^4)$$

$$s=10, p=5$$

$$x^{(5)}[10]=-6, 14, -1, -11, -6, 6, 11, 1, -14, 6$$

$$x^{(5)}=1/320(6067/3 \times x+(-310)/3 \times x^3+x^5)$$

$$x^{(5)}=31250000000000000 \times 10^{-20}(202233333333333333 \times 10^{-14} \times x+(-10333333333333333 \times 10^{-15}) \times x^3+x^5)$$

$$s=10, p=6$$

$$x^{(6)}[10]=3, -11, 10, 6, -8, -8, 6, 10, -11, 3$$

$$x^{(6)}=11/15360(-14625+39329/11 \times x^2+(-1345)/11 \times x^4+x^6)$$

$$x^{(6)}=71614583333333333 \times 10^{-21}(-14625+3575363636363636 \times 10^{-14} \times x^2+(-1222727272727272 \times 10^{-15}) \times x^4+x^6)$$

$$s=10, p=7$$

$$x^{(7)}[10]=-9, 47, -86, 42, 56, -56, -42, 86, -47, 9$$

$$x^{(7)}=143/107520(-6750831/143 \times x+749357/143 \times x^3+(-1799)/13 \times x^5+x^7)$$

$$x^{(7)}=132998511904761905 \times 10^{-20}(-472086083916083916 \times 10^{-13} \times x+$$

$$+524025874125874126 \times 10^{-14} \times x^3 + (-138384615384615385 \times 10^{-15}) \times x^5 + x^7$$

$$s = 10, p = 8$$

$$x^{(8)}[10] = 1, -7, 20, -28, 14, 14, -28, 20, -7, 1$$

$$x^{(8)} = 143/1032192(187425 + (-66515212)/715 \times x^2 + 88494/13 \times x^4 + (-756)/5 \times x^6 + x^8)$$

$$x^{(8)} = 138540116567460317 \times 10^{-21}(187425 + (-930282685314685315 \times 10^{-13}) \times x^2 + 680723076923076923 \times 10^{-14} \times x^4 + (-15120000000000000 \times 10^{-15}) \times x^6 + x^8)$$

$$s = 10, p = 9$$

$$x^{(9)}[10] = -1, 9, -36, 84, -126, 126, -84, 36, -9, 1$$

$$x^{(9)} = 2431/9289728(7462789083/12155 \times x + (-31022996)/221 \times x^3 + 684894/85 \times x^5 + (-2724)/17 \times x^7 + x^9)$$

$$x^{(9)} = 261686886849647260 \times 10^{-21}(613968661703002879 \times 10^{-12} \times x + (-140375547511312217 \times 10^{-12}) \times x^3 + 805757647058823529 \times 10^{-14} \times x^5 + (-160235294117647058 \times 10^{-15}) \times x^7 + x^9)$$

$$s = 11, p = 1$$

$$x^{(1)}[11] = -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5$$

$$s = 11, p = 2$$

$$x^{(2)}[11] = 15, 6, -1, -6, -9, -10, -9, -6, -1, 6, 15$$

$$x^{(2)} = 1(-10 + x^2)$$

$$x^{(2)} = 100000000000000000 \times 10^{-17}(-10 + x^2)$$

$$s = 11, p = 3$$

$$x^{(3)}[11] = -30, 6, 22, 23, 14, 0, -14, -23, -22, -6, 30$$

$$x^{(3)} = 5/6(-89/5 \times x + x^3)$$

$$x^{(3)} = 833333333333333333 \times 10^{-18}(-17800000000000000 \times 10^{-16} \times x + x^3)$$

$$s = 11, p = 4$$

$$x^{(4)}[11] = 6, -6, -6, -1, 4, 6, 4, -1, -6, -6, 6$$

$$x^{(4)} = 1/12(72 + (-25) \times x^2 + x^4)$$

$$x^{(4)} = 833333333333333333 \times 10^{-18}(72 + (-25) \times x^2 + x^4)$$

$$s = 11, p = 5$$

$$x^{(5)}[11] = -3, 6, 1, -4, -4, 0, 4, 4, -1, -6, 3$$

$$x^{(5)} = 1/40(572/3 \times x - 95/3 \times x^3 + x^5)$$

$$x^{(5)} = 250000000000000000 \times 10^{-19}(19066666666666667 \times 10^{-15} \times x + (-31666666666666667 \times 10^{-16}) \times x^3 + x^5)$$

$$s = 11, p = 6$$

$$x^{(6)}[11] = 15, -48, 29, 36, -12, -40, -12, 36, 29, -48, 15$$

$$x^{(6)} = 11/120(-4800/11 + 3764/11 \times x^2 + (-415)/11 \times x^4 + x^6)$$

$$x^{(6)}=91686666666666666667 \times 10^{-19}(-436363636363636364 \times 10^{-15} + 342181818181818182 \times 10^{-15} \times x^2 + (-377272727272727273 \times 10^{-16}) \times x^4 + x^6)$$

$$s=11, p=7$$

$$x^{(7)}[11]=-5, 23, -33, 2, 28, 0, -28, -2, 33, -23, 5$$

$$x^{(7)}=143/5040(-16020/11 \times x + 73157/143 \times x^3 + (-560)/13 \times x^5 + x^7)$$

$$x^{(7)}=283730158730158730 \times 10^{-19}(-145636363636363636 \times 10^{-14} \times x + 51587412587412587 \times 10^{-15} \times x^3 + (-430769230769230769 \times 10^{-16}) \times x^5 + x^7)$$

$$s=11, p=8$$

$$x^{(8)}[11]=5, -31, 73, -68, -14, 70, -14, -68, 73, -31, 5$$

$$x^{(8)}=143/4032(282240/143 + (-2147916)/715 \times x^2 + 8869/13 \times x^4 + (-238)/5 \times x^6 + x^8)$$

$$x^{(8)}=354662698412698413 \times 10^{-19}(197370629370629371 \times 10^{-14} + (-300407832167832168 \times 10^{-14}) \times x^2 + 682230769230769231 \times 10^{-15} \times x^4 + (-47600000000000000 \times 10^{-16}) \times x^6 + x^8)$$

$$s=11, p=9$$

$$x^{(9)}[11]=-1, 8, -77, 48, -42, 0, 42, -48, 27, -8, 1$$

$$x^{(9)}=2431/181440(17460288/2431 \times x + (-1068260)/221 \times x^3 + 14217/17 \times x^5 + (-870)/17 \times x^7 + x^9)$$

$$x^{(9)}=133983686067019400 \times 10^{-19}(718234800493624023 \times 10^{-14} \times x + (-483375565610859720 \times 10^{-14}) \times x^3 + 836294117647058820 \times 10^{-15} \times x^5 + (-511764705882352941 \times 10^{-16}) \times x^7 + x^9)$$

$$s=11, p=10$$

$$x^{(10)}[11]=1, -10, 45, -120, 210, -252, 210, -120, 45, -10, 1$$

$$x^{(10)}=46189/907200(-228614400/46189 + 61791624/4199 \times x^2 + (-2113910)/323 \times x^4 + 308679/323 \times x^6 + (-1020)/19 \times x^8 + x^{10})$$

$$x^{(10)}=509138007054673720 \times 10^{-19}(-494954209876810490 \times 10^{-14} + 147157951893307930 \times 10^{-13} \times x^2 + (-654461300309597520 \times 10^{-14}) \times x^4 + 955662538699690402 \times 10^{-15} \times x^6 + (-536842105263157694 \times 10^{-16}) \times x^8 + x^{10})$$

$$s=12, p=1$$

$$x^{(1)}[12]=-11, -9, -7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7, 9, 11$$

$$s=12, p=2$$

$$x^{(2)}[12]=55, 25, 1, -17, -29, -35, -35, -29, -17, 1, 25, 55$$

$$x^{(2)}=3/4(-143/3 + x^2)$$

$$x^{(2)}=750000000000000000 \times 10^{-18}(-476666666666666667 \times 10^{-16} + x^2)$$

$$s=12, p=3$$

$$x^{(3)}[12]=-33, 3, 21, 25, 19, 7, -7, -19, -25, -21, -3, 33$$

$$x^{(3)}=1/12(-85 \times x + x^3)$$

$$x^{(3)}=83333333333333333333 \times 10^{-18}(-85 \times x + x^3)$$

$$s = 12, p = 4$$

$$x^{(4)} [12] = 33, -27, -33, -13, 12, 28, 28, 12, -13, -33, -27, 33$$

$$x^{(4)} = 7/384(11583/7 + (-838)/7 \times x^2 + x^4)$$

$$x^{(4)} = 182291666666666667 \times 10^{-19}(165471428571428571 \times 10^{-14} + (-119714285714285714 \times 10^{-15}) \times x^2 + x^4)$$

$$s = 12, p = 5$$

$$x^{(5)} [12] = -33, 57, 21, -29, -44, -20, 20, 44, 29, -21, -57, 33$$

$$x^{(5)} = 3/640(39761/9 \times x + (-1370)/9 \times x^3 + x^5)$$

$$x^{(5)} = 46875000000000000 \times 10^{-20}(4417888888888889 \times 10^{-14} \times x + (-15222222222222222 \times 10^{-15}) \times x^3 + x^5)$$

$$s = 12, p = 6$$

$$x^{(6)} [12] = 11, -31, 11, 25, 4, -20, -20, 4, 25, 11, -31, 11$$

$$x^{(6)} = 11/23040(-49725 + 88169/11 \times x^2 + (-2005)/11 \times x^4 + x^6)$$

$$x^{(6)} = 47743055555555556 \times 10^{-21}(-49725 + 8015363636363636 \times 10^{-14} \times x^2 + (-1822727272727273 \times 10^{-15}) \times x^4 + x^6)$$

$$s = 12, p = 7$$

$$x^{(7)} [12] = -55, 225, -251, -83, 204, 140, -140, -204, 83, 251, -225, 55$$

$$x^{(7)} = 143/161280(-24287427/143 \times x + 1738037/143 \times x^3 + (-2723)/13 \times x^5 + x^7)$$

$$x^{(7)} = 886656746031746032 \times 10^{-21}(-169842146853146853 \times 10^{-12} \times x + 121541048951048951 \times 10^{-13} \times x^3 + (-209461538461538462 \times 10^{-15}) \times x^5 + x^7)$$

$$s = 12, p = 8$$

$$x^{(8)} [12] = 11, -61, 119, -65, -74, 70, 70, -74, -65, 119, -61, 11$$

$$x^{(8)} = 143/1720320(1187025 + (-154947620)/429 \times x^2 + 643706/39 \times x^4 + (-700)/3 \times x^6 + x^8)$$

$$x^{(8)} = 831240699404761900 \times 10^{-22}(1187025 + (-361183263403263403 \times 10^{-12}) \times x^2 + 165052820512820513 \times 10^{-13} \times x^4 + (-23333333333333333 \times 10^{-15}) \times x^6 + x^8)$$

$$s = 12, p = 9$$

$$x^{(9)} [12] = -11, 79, -227, 303, -102, -210, 210, 102, -303, 227, -79, 11$$

$$x^{(9)} = 2431/46448640(11175766191/2431 \times x + (-133753316)/221 \times x^3 + 352086/17 \times x^5 + (-4308)/17 \times x^7 + x^9)$$

$$x^{(9)} = 523373773699294532 \times 10^{-22}(459718888975730150 \times 10^{-11} \times x + (-605218624434389140 \times 10^{-12}) \times x^3 + 207109411764705882 \times 10^{-13} \times x^5 + (-253411764705882352 \times 10^{-15}) \times x^7 + x^9)$$

$$s = 12, p = 10$$

$$x^{(10)} [12] = 1, -9, 35, -75, 90, -42, -42, 90, -75, 35, -9, 1$$

$$x^{(10)} = 4199/928972800(-18753525 + 43264132659/4199 \times x^2 +$$

$$\begin{aligned} &+(-279712070)/323 \times x^4 + 7880334/323 \times x^6 + (-5115)/19 \times x^8 + x^{10}) \\ x^{(10)} &= 452004622740299823 \times 10^{-23} (-18753525 + 103034371657537508 \times \\ &\times 10^{-10} \times x^2 + (-86598164086687306 \times 10^{-11}) \times x^4 + 243973188854489164 \times \\ &\times 10^{-13} \times x^6 + (-269210526315789473 \times 10^{-15}) \times x^8 + x^{10}) \end{aligned}$$

$$s = 12, p = 11$$

$$x^{(11)}[12] = -1, 11, -55, 165, -330, 462, -462, 330, -165, 55, -11, 1$$

$$x^{(11)} = 4199/486604800 (-2041324519125/29393 \times x + 115158567403/6783 \times \\ \times x^3 + (-353482470)/323 \times x^5 + 3616514/133 \times x^7 + (-5885)/21 \times x^9 + x^{11})$$

$$x^{(11)} = 862917916140572390 \times 10^{-23} (-694493423306569590 \times 10^{-10} \times x + \\ + 169775272597670647 \times 10^{-10} \times x^3 + (-109437297213622291 \times 10^{-11}) \times x^5 + \\ + 271918345864661654 \times 10^{-13} \times x^7 + (-280238095238095238 \times 10^{-15}) \times x^9 + \\ + x^{11})$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патон Б.Е. Про основные задачи Академии наук Украины на современном этапе // Вестник Академии наук Украины. — 1993. — № 8. — С. 3—11, 52.
2. Ишлинский А.Ю. Гидромеханика и тепломассообмен при получении материалов. Научное сообщение // Вестник Академии наук СССР.— 1987.— № 6. — С. 3—17.
3. Под общественный контроль // Социалистическая индустрия. — 1989. — 17 февр. — С. 1.
4. Флейшман Б.С. Основы системологии. — М.: Радио и связь, 1982. — 368 с.
5. Микроэлектроника — ключевая технология: Сокр. пер. с нем. / А. Браун, В. Хайдель, В. Хюбнер и др.; Науч. ред: Р. Веллер, К. Цуравски. — М.: Экономика, 1987. — 272 с.
6. Лисичкин В. Информационный кризис. Если Россия его не преодолет, реформы не пойдут // Инженерная газета. — 1993. — Авг. — № 93. — С. 2.
7. Михайлов В. Научные кадры Украины: проблемы, потери, падение престижа... // Бизнес. — 1993. — № 34(38). — 26 авг. — С. 31.
8. Харрингтон Дж.Х. Управление качеством в американских корпорациях: Сокр. пер. с англ. / Авт. вступ. ст. и науч. ред. Л.А. Конарева. — М.: Экономика, 1990. — 272 с.
9. Макаров В.Л. Информатизация и экономика интеллектуальных продуктов // Компьютеры и экономика: экономические проблемы компьютеризации общества.— М.: Наука, 1991. — 190 с. (Серия " Кибернетика — неограниченные возможности и возможные ограничения").
10. Цветов В.Я. Япония: свет и тени научно-технической революции // Лес за деревьями. Рассказы о том, чего мы не знаем, но хотели бы знать о капиталистическом обществе: Сб.— М.: Знание, 1991. — 304 с.
11. Булах Ю. Япония принимает ультиматум // Литературная газета. — 1988. — 17 февр. — С. 14.
12. Бюллетень иностранной научно-технической информации // ТАСС. — 1987. — 24 июня. — № 25 (2323). — С. 33—34.
13. Информационная модель Киева // Наука и общество. — 1988.— № 11. — С. 8—11.
14. Громов Г.Р. Национальные информационные ресурсы: проблемы промышленной эксплуатации / Отв. ред. д.т.н. Д.А. Поспелов. — М.: Наука, 1984. — 240 с.
15. Шергин С.А. Азия нам поможет? // Посредник. — 1993. — 28 июль — 3 авг. — С. 6.
16. Маркс К. Заметки о новейшей прусской цензурной инструкции // Соч. — 2-е. изд. — Т. 1. — С. 3—27.

17. Самарский А.А. [Выступление на годовичном общем собрании Академии наук СССР] // Вестник Академии наук СССР. — 1987. — № 8. — С. 24—26.

18. Неуймин Я.Г. Модели в науке и технике. История, теория, практика / Под ред. Н.С. Соломенко. — Л.: Наука, Ленинград. отд., 1984. — 190 с.

19. Трошин Д.М., Малахова А.М. Курс философии и профиль инженера // Вестник высш. шк. — 1976. — № 10. — С. 75—76.

20. Клушин М.И. К вопросу о методологии теории обработки металлов резанием как прикладной технологической науки // Вопросы обработки металлов резанием. — Иваново: Б.и., 1973. — С. 3—9.

21. Разработка и внедрение методики испытания агрегатов и узлов на основе методов математической теории планирования эксперимента: Отчет о НИР № 967 за 1975—1985 гг. (промежуточ.) / Киев. политехн. ин-т; Руководитель С.Г. Радченко. — К., 1975. — Отв. исполн. С.Г. Радченко, Е.С. Пуховский, С.Н. Лапач, Н.П. Зинченко, С.С. Добрянский и др. — Рукоп. работа.

Ч.1. — 1975. — 70 с.; Ч.2. — 1975. — 30 с.; Ч.3. — 1975. — 59 с.; Ч.4. — 1976. — 32 с.; Ч.5. — 1976. — 32 с.; Ч.6. — 1976. — 69 с.; Ч.7. — 1977. — 60 с.; Ч.8. — 1977. — 60 с.; Ч.9.—10. — 1978. — 86 с.; Ч.11. — 1978. — 51 с.; Ч.12. — 1978. — 47 с.; Ч.13. — 1979. — 47 с.; Ч.14. — 1979. — 64 с.; Ч.15. — 1980. — 29 с.; Ч.16. — 1980. — 84 с.; Ч.17. — 1981. — 65 с.; Ч.18. — 1981. — 94 с.; Ч.19. — 1982. — 74 с.; Ч.20. — 1982. — 54 с.; Ч.21. — 1983. — 101 с.; Ч.22. — 1983. — 91 с.; Ч.23. — 1984. — 87 с.; Ч.24. — 1984. — 47 с.; Ч.25. — 1985. — 115 с.

22. Португал В.М. Пятое поколение. — К.: Техника, 1988. — 166 с.

23. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. Изд. 2-е, доп. и перераб. Учеб. пособие для вузов. — М.: Машиностроение, 1966. — 556 с.

24. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня. — М.: Знание, 1974. — С. 5—49.

25. Лановой В. Страдания украинской экономики на эшафоте агонизирующей политической системы // Киевские ведомости. — 1993. — 16 июля. — С. 4.

26. Соболев Б.В. Расхожее мнение о нашем сырьевом богатстве — миф, и очень вредный // Бизнес (Блиц-информ). — 1993. — 20 июля. — № 29 (33). — С. 2.

27. Марчук Г.И. О задачах Академии Наук СССР, вытекающих из решений XIX Всесоюзной партийной конференции // Вестник Академии Наук СССР. — 1989. — № 2. — С. 7—37.

28. Тихонов А.Н. Математические модели и научно-технический прогресс (автоматизация обработки наблюдений) // Наука и человечество. 1979. Международный ежегодник. — М.: Знание, 1979. — 400 с.

29. Исикава К. Японские методы управления качеством: Сокр. пер. с англ. / Науч. ред. и авт. предисл. А.В. Гличев. — Ч. 1. — М.: Экономика, 1988. — 215 с.

30. Справка по деятельности кружков качества (к 23 всеяпонской конференции по статистическим методам контроля качества) // Хедзюнка то хинсицу канри (Япония). — 1989. — № 4. — С. 37.

31. Шальнев А. "Деловое вторжение" Японии в США // Известия. — 1990. — 4 мая. — С. 5.

32. Лисенков А.Н. Математические методы планирования многофакторных медико-биологических экспериментов. — М.: Медицина, 1979. — 344 с. (Академия медицинских наук СССР).

33. Мойзыш М.М., Подобедов В.А. Оценка эффективности математического планирования численных и физических экспериментов // Научно-методические материалы. Реализация численных методов на ЭВМ и вопросы системного программирования / Под ред. В.А. Апарина, Ю.Б. Лебединского. — М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1985, с. 30 — 36 (Военно-воздушная инженерная орденов Ленина и Октябрьской революции Краснознаменная академия имени профессора Н.Е. Жуковского).

34. Братухин А. Пассажир всегда прав // Поиск. — 1993 — 17 — 23 сент. — № 37. — С. 5.

35. Чебышев П.Л. Черчение географических карт. Соч. — Т.1. — С. 239.

36. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности "Технология машиностроения..." — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. — 496 с.

37. Артоболевский И. Это нужно стране // Правда. — 1971. — 19 марта. — С. 3.

38. Гаврилов А.Н. Основы технологии приборостроения. Учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 1976. — 328 с.

39. Радченко С.Г. Математическое моделирование зоны оптимума по критерию точности при нарезании наружных резьб самораскрывающимися головками // Прогрессивная технология формообразования и контроля резьб: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. — Тула, 1980. — С. 39—40.

40. Оптимизация параметров обработки глубоких отверстий / С.П. Крапивин, С.Г. Радченко, В.Н. Беспалько, В.К. Фролов // Авиационная промышленность. — 1986. — № 5. — С. 42—44.

41. Влияние конструктивно-технологических факторов на прочность клееклепанных соединений композиционных материалов / В.А. Матвиенко, Е.И. Позняков, О.Н. Огурек, С.Г. Радченко, Л.М. Стариков, В.В. Мерзлюк // Авиационная промышленность. — 1986. — № 11. — С. 11—12.

42. Таури Г.Э., Добрянский С.С., Радченко С.Г. Оптимизация процесса нарезания наружных резьб головкой по критерию точности // Научные ос-

новы автоматизации производственных процессов в машиностроении и приборостроении: Тез. докл. Всесоюз. конф. — М., 1975. — С. 51—53.

43. Кован В.М. и др. Основы технологии машиностроения: Учеб. для вузов / В.М. Кован, В.С. Корсаков, А.Г. Косилова и др.; Под ред. В.С. Корсакова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1977. — 416 с.

44. Предисловие // Якобс Г.Ю., Якоб Э., Кохан Д. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации: Пер. с нем. / Пер. канд. техн. наук В.Ф. Колоденков. — М.: Машиностроение, 1981. — 279 с.

45. Маркс К., Энгельс Ф. Соч. — 2-е изд. — Т. 20. — С. 366.

46. Развитие науки о резании металлов. Ред. коллегия: Н.Н. Зорев, Г.И. Грановский, М.Н. Ларин и др. / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. — М.: Машиностроение, 1967. — 416 с.

47. Сидоров А.И. Основные принципы проектирования и конструирования машин. — М.: Макиз, 1929. — 428 с.

48. Коуэн Томас А. Искусство воплощения в практике того, что мы проповедуем // Искусство и наука системной практики. Науч. ред. Ф.И. Перегудов. — М.: Б.и., 1989. — 192 с.

49. Силин А.А. Гуманизация инженера // Техника молодежи. — 1987. — № 8. — С. 26.

50. Попов Ю.П., Самарский А.А. Вычислительный эксперимент // Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. Введение в информатику с позиций математического моделирования / Авт. пред. А.А. Самарский. — М.: Наука, 1988. — 176 с. — (Серия "Кибернетика — неограниченные возможности и возможные ограничения").

51. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. — М.: Наука, 1968. — 399 с.

52. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. — Киев: Техніка. — 1977. — 768 с.

53. Лопатников Л.И. Популярный экономико-математический словарь. — 3-е изд., доп. — М.: Знание, 1990. — 256 с.

54. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. — М.: Наука, 1973. — 416 с.

55. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / Пер. с англ. Ю.А. Данилова; общ. ред. и послесл. В.И. Аршинова и др. — М.: Прогресс, 1986. — 431 с.

56. Соколовский А.П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках. — М.-Л., Машгиз, 1952. — 288 с.

57. Адлер Ю.П. Новое направление в статистическом контроле качества — методы Тагути // Качество и надежность изделий. № 2. — М.: Знание, 1988. — 116 с. — (В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества промышленных изделий при Политехническом музее).

58. Плошко Б.Г., Елисева И.И. История статистики: Учеб. пособие. — М.: Финансы и статистика, 1990. — 295 с.
59. Самарский А.А. Компьютеры. Как нам их осваивать? // НТР: проблемы и решения. — 16 июля — 5 авг. — № 5. — С. 1, 4 — 5.
60. Малютов М.Б. Предисловие редактора перевода // Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. Пер. с англ. В.П. Носко. Под ред. М.Б. Малютова. — М.: Мир, 1980. — 456 с.
61. Ермаков Ю.М. Нелегкие пути растачивания // Станки и инструмент. — 1993. — № 3. — С. 30 — 35.
62. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. — М.: Наука, 1971. — 424 с. (Серия "Оптимизация и исследование операций").
63. Бир Ст. Кибернетика и управление производством / Пер. с англ. В.Я. Алтаева. Под ред. А.Б. Челюсткина. — Изд. 2-е, доп. — М.: Наука, 1965. — 391 с.
64. Чупров А.А. Очерки по теории статистики. — М.: Госстатиздат, 1959. — 320 с.
65. Фролов К. Механика Ньютона. К 300-летию выхода в свет работы "Математические начала натуральной философии" // Правда. — 1987. — 21 нояб. — С. 3.
66. Илей Л. Фирма Nirpondenso — проводник методов Тагути // Автомобильная промышленность США. — 1987. — № 7. — С. 13. (На русс. яз.).
67. Заводян А.В., Королькевич В.А. Новая концепция качества и проектирование робастных систем // Стандарты и качество. 1989. — № 11. — С. 43 — 45.
68. Белл Ф.Дж. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. В 2-х частях. Ч. 1. Малые деформации: Пер. с англ. / Под ред. А.П. Филина. — М.: Наука, 1984. — 600 с.
69. Новик И.Б. Вопросы стиля мышления в естествознании. — М.: Политиздат, 1975. — 144 с.
70. Кант И. Сочинения. В 6 т. Т.3 / Под общ. ред. В.Ф. Асмуса и др. — М.: Мысль, 1964. — 799 с.
71. Новожилов В.В. Этажи математики // Студенческий меридиан. Альманах. — Вып. 5. — М.: Молодая гвардия, 1972. — С. 40 — 41.
72. Акоф Р.Л., Сасиени М.В. Основы исследования операций / Пер. с англ. и предисл. В.Я. Алтаева. Под ред. И.А. Ушакова. — М.: Мир, 1971. — 534 с.
73. Жданов Ю. Философские проблемы современного естествознания // Правда. — 1984. — 31 авг. — С. 2.
74. Адлер Ю., Горский В. Эксперимент в промышленности // Правда. — 1973. — 26 марта. — № 85. — С. 2.
75. Автоматизация научных экспериментов и научно-технический прогресс // Механизация и автоматизация управления. — 1970. — № 5 — С. 4.

76. Захаров С.Д., Тугов И.И., Явелов Б.Е. Физика наших дней. — М.: Знание, 1977. — С. 70.

77. Теплофизика механической обработки: Учеб. пособие / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. — К.; Одесса: Лыбидь, 1991. — 240 с.

78. Флёров Г., Барашенков В. Перспективы науки и фундаментальные исследования // Политическое самообразование. — 1976. — № 1. — С. 77 — 84.

79. Радченко С.Г. Программа курса "Теория планирования эксперимента" для аспирантов и соискателей техн. спец. / Киев. политехн. ин-т. — К.: КПИ, 1987. — 20 с.

80. Эльясберг П.Е. Измерительная информация: сколько ее нужно? Как ее обрабатывать? — М.: Наука, 1983. — 208 с.

81. Адлер Ю.П., Грановский Ю.В., Маркова Е.В. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее. — М.: Знание, 1982. — 64 с.— (Новое в жизни, науке, технике. Сер. "Математика, кибернетика"; № 2).

82. Волчков Л.И. Где вы, инженеры по автоматизации? // Техника и наука. — 1979. — № 5. — С. 22—23.

83. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. Пер. с нем. Г.А. Фомина и Н.С. Лецкой; Под ред. Э.К. Лецкого. — М.: Мир, 1977. — 552 с.

84. Таурит Г.Э., Добрянский С.С., Радченко С.Г. Исследование составляющих сил резьбонарезания с помощью математической теории планирования эксперимента // Технология и автоматизация машиностроения. — К.: 1974. — Вып. 13. — С. 116—124.

85. Исследование прочности клеевых соединений трубопроводов из поливинилхлорида (ПВХ-100) с применением метода планирования эксперимента / В.И. Обвинцев, Ю.С. Бурбело, А.В. Сидоренко, С.Г. Радченко // Состояние и перспективы развития сварки и склеивания термопластов: Сб. науч. тр. / ИЭС им. Е.О. Патона. — К., 1982. — С. 81—87.

86. Налимов В.В. Предисловие к русскому изданию // Хикс Ч.Р. Основные принципы планирования эксперимента / Пер. с англ. Под ред. В.В. Налимова. — М.: Мир, 1967. — 407 с.

87. Тэйлор Ф.У. Принципы научного менеджмента: Пер. с англ. А.И. Зак; Научн. ред. и предисл. Е.А. Кочерина. — М.: Журнал "Контролинг". — 1991. — 104 с. (Классики менеджмента; Вып. 1).

88. Тэйлор Ф. Искусство резать металлы / Пер. под ред. А.В. Панкина и Л.А. Левенстерна с пред. проф. А.Д. Гатцука. Изд. 2-е. — Берлин: Бюро ин. науки и техн., 1922. — 356 с.

89. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Т. 3. Материалы по физике резания металлов. — Томск: Красное Знамя, 1944. — 742 с.

90. Рудник С.С. Экспериментальные и теоретические основы рационального использования станка и резца при скоростном точении // Передо-

вая технология машиностроения. Материалы 1-го Всесоюз. совещания ученых с новаторами производства машиностроения 14–18 дек. 1954 г. Отв. ред. акад. В.И. Дикушин. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 736 с.

91. Роджерс Э. Физика для любознательных / Пер. с 8-го амер. изд. / Под ред. проф. В.Ф. Киселева. Общ. ред. акад. Л.А. Арцимовича. Т. 3. Электричество и магнетизм. Атомы и ядра. — М.: Мир, 1971. — 664 с.

92. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. Вып. 2. Под. ред. и с предисл. Ю.П. Адлера и В.Н. Варыгина — М.: Статистика, 1978. — 335 с.

93. Крылов А.Н. Мои воспоминания. — Л.: Судостроение, 1979. — 480 с.

94. Вульф А.М. Резание металлов. — М.-Л.: Машгиз. — 1963. — 428 с.

95. Ву С.М. Испытания стойкости инструмента по методу характеристических поверхностей // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Серия В. Конструирование и технология машиностроения. — 1964. — № 2. — Т. 86. — С. 25–38.

96. Colding N.B. A Three-Dimensional Tool-Life Equation — *Machining Economics, Trans. ASME, vol. 81, 1959, pp. 239–250.*

97. Colding N.B. "Machining of Metals and Machining Costs", *International Journal of Machine Tool Design and Research, Pergamon Press, New York, N.Y., vol. 1, 1961, pp. 220–248.*

98. Аваков А.А. Физические основы теорий стойкости режущих инструментов. — М.: Машгиз. — 1960. — 308 с.

99. Кривоухов В.А. Ускоренный метод нахождения стойкостных и силовых зависимостей для составления нормативов по режимам резания // Станки и инструмент. — 1960. — № 6. — С. 32–34.

100. Равская Н.С. Использование метода самоорганизации для исследования влияния режимов резания на шероховатость поверхности // Резание и инструмент. — 1983. — Вып. 29. — С. 33–36.

101. Родин П.Р., Равская Н.С., Касьянов А.И. Монолитные твердосплавные концевые фрезы. — К.: Выща школа. Изд-во при Киев. ун-те, 1985. — 64 с.

102. Теория проектирования инструмента и его информационное обеспечение: маркетинг, квалиметрия, надежность и оптимизация / Г.Л. Хает, В.С. Гузенко, Л.Г. Хает и др.: Под общ. ред. Г.Л. Хаета. — Краматорск: ДГМА, 1994. — 370 с.

103. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1981. — 152 с.

104. Слово о науке: Афоризмы. Изречения. Лит. цитаты. Книга вторая / Сост., авт. предисл. и введ. к главам Е.С. Лихтенштейн. — М.: Знание, 1981. — 272 с.

105. Патон Б.Е. Научный результат начинает служить обществу, когда получает воплощение в технологии // НТР: проблемы и решения. — 11 — 17 июня. — № 2. — С. 4—5.
106. Данилевский В.В. Технология машиностроения. Изд. 4-е, перераб. и доп. Учеб. для техникумов. — М.: Высш. шк., 1977. — 480 с.
107. Соколовский А.П. Жесткость в технологии машиностроения. — М.: Машгиз, 1946. — 207 с.
108. Корсаков В.С. Научные основы технологии машиностроения и применение ЭВМ в технологическом проектировании // Передовая технология и автоматизация управления процессами обработки деталей машин / Под общ. ред. д-ра техн. наук проф. А.А. Маталина. — Л.: Машиностроение, 1970. — С.7—13.
109. Кошкин Л.Н. [Выступление на годовичном общем собрании Академии наук СССР] // Вестник Академии наук СССР. — 1987. — № 8. — С. 22—23.
110. Волчкевич. Л.И. Предисловие // Скотт П. Промышленные роботы — переворот в производстве: Сокр. пер. с англ. / Авт. предисл. и науч. ред. Л.И. Волчкевич. — М.: Экономика, 1987. — 304 с.
111. Легасов В. В первом веке новой эры. Заметки о наступающем "технологическом перевороте" // Московские новости. — 1987. — 11 окт. — С. .
112. Пилдич Дж. Путь к покупателю. О том, как преуспевающие компании делают товары, которые мы с удовольствием покупаем: Пер. с англ. / Общ. ред. и вступ. ст. Е.М. Пеньковой. — М.: Прогресс, 1991. — 256 с.
113. Фаруки А.М. Наука и технология: дилемма "третьего мира" // Импакт. — 1987. — № 1. — С. 3 — 15.
114. Сассен Джейн. 1992 год: на автофронте ждут перемен // Инженер. — № 2. — С. 26 — 28.
115. Легасов В. Из сегодня — в завтра // Правда. — 1987. — 5 окт. — С. 3.
116. Данелян Р.Г. В лабиринтах качества. — М.: Политиздат, 1989. — 128 с.
117. Дорого обходится скупость в финансировании и оснащении академической науки // Известия. — 1988. — 10 авг. — С. 2.
118. Шмелев Н. Авансы и долги // Новый мир. — 1987. — № 6. — С. 142 — 158.
119. Самарский А.А. Модели для открытий. Наука в поиске // Правда. — 1986. — 31 янв. — С. 3.
120. Автомобиль: хоть и зеленый, но такой нужный // Деловой мир. — 1993. — 27 февр. — С. 5.
121. Известия. — 1992. — 20 окт. — С. 1.
122. Курицын А.Н. Японские "кружки качества" в США // США — экономика, политика, идеология. — 1982. — № 3. — С. 93—101.

123. Боус А. "Боус" приходит в Россию / Беседу провел Н. Петров // Деловой мир. — 1993. — 19 авг. — С. 16.

124. Радченко С.Г. Исследование точности процесса нарезания наружных резьб самораскрывающимися головками: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. — Защищена 20.12.76; Утв. 6.04.77; 013843. — К., 1976. — 199 с. — Библиогр.: С. 156—163 (81 назв.).

125. Основы управления технологическими процессами / Под ред. Н.С. Райбмана / С.А. Анисимов, В.Н. Дынькин, А.Д. Касавин и др. — М.: Наука, 1978. — 440 с.

126. Лихобабин Б.И. Разработка и исследование транспортирующих механизмов бортовой аппаратуры магнитной записи с фрикционными перемещениями. Автореф... канд. техн. наук. — Каунас, Каунас. ПИ, 1984. — 23 с.

127. Жилис В.И. Современные конструкции спиральных сверл. (По материалам отечественных и зарубежных источников). Под ред. проф. М.Т. Галая // Новые конструкции и технология производства режущих инструментов / Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. 21—23 июня 1966 г. — М.: Б. и., 1966. — С. 3 — 11.

128. Fischer J., Ritter H. Wahl der Schnittbedingungen beim Schlichtdrehen // Fertigungstechn. und Bert. — 1972.— 22. — № 4. — S. 220 — 225.

129. Таурит Г.Э., Радченко С.Г. Установление значимости влияния некоторых факторов на точность наружного резьбонарезания // Технология и автоматизация машиностроения. — К., 1973. — Вып. 10. — С. 58—63.

130. Арсеньев Ю.Д. Инженерно-экономические расчеты в обобщенных переменных: Учеб. пособие для студентов вузов. — М.: Высш. шк., 1979. — 215 с.

131. Душинский В.В., Пуховский Е.С., Радченко С.Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. канд. техн. наук Г.Э. Таурита. — К.: Техніка, 1977. — 176 с.

132. Кузнецов Ю.Н. Станки с ЧПУ: Учеб. пособие. — К.: Выща шк., 1991. — 278 с.

133. Базров Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. — М.: Машиностроение, 1984. — 256 с. — (Б-ка технолога).

134. Бородачев Н.А. Математические представления закономерностей хода рабочих процессов — основа теории комплексной автоматизации // Автоматизация процессов машиностроения. Т. 3. Обработка резанием, упрочнение и сборка. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — С. 3—17.

135. Лозв М. Теория вероятностей. — М., 1962. — 719 с.

136. Блох А. Илья Пригожин в Москве // Деловой мир. Наука и бизнес. — 1993. — 11 июня. — С. 10.

137. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1990. — 544 с.

138. Гордиенко Б.И., Краплин М.А. Оптимальные режимы металлорежущих станков / Под ред. д.т.н., проф. С.С. Четверикова. — Ростов-на-Дону: Б. и., 1969. — 320 с.
139. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение / Пер. с англ. Ф.М. Израйлева, М.И. Малкина, А.М. Реймана. Под ред. А.В. Гапонова-Грехова, М.И. Рабиновича. — М.: Мир, 1988. — 240 с.
140. Кадомцев Б. Нет ничего практичнее хорошей теории // Техника—молодежи. — 1971. — № 8. — С. 6.
141. Лаплас П.С. Опыт философии теории вероятностей. — М., 1908. — с.
142. Грицаенко Ю.А. Разрушение инструмента как случайный процесс // Прочность режущего инструмента. Материалы 2-го семинара по прочно-сти. Под ред. К.Ф. Романова. — М.: Б. и., 1969. — С. 6 — 12.
143. Курапов А.Н. Прогнозирование в теории точности производства (применительно к токарной обработке на автоматах и автоматических линиях). Автореф. ... д-р техн. наук. — М., 1971. — 30 с.
144. Линник Ю.В., Хусу А.П. Вероятностные методы при оценке качества обработки поверхностей // Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки. Межвузовский сб. — Л.: Изд. Северо-Западного ЗПИ, 1974. — 156 с.
145. Кудинов В.А. Динамика станков. — М.: Машиностроение, 1967. — 359 с.
146. Синопальников В.А. Зависимости процесса резания как случайные функции // Станки и инструмент. — 1968. — № 7. — С. 38 — 39.
147. Веденский В.А. Разработка норм жесткости металлорежущих станков // Стандартизация. — 1961. — № 6. — С. 16 — 22.
148. Коханов Е.Ф., Бармин Б.П., Кудрявина Т.А. Жесткость как параметр производительности технологической системы станок — деталь — инструмент // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 1970. — № 3. — С. 151 — 156.
149. Бурмистенко Б.М., Жук К.Д., Роде Д.В. Основные задачи, решаемые системой автоматизации научного эксперимента // Механизация и автоматизация управления. — 1970. — № 5. — С. 5 — 13.
150. Каазик Ю.Я. Математический словарь. — Таллин: Валгус, 1985. — 296 с.
151. Артоболевский И.И. Механика и управление машинами // Будущее науки. Международный ежегодник. Вып. 9. — М.: Знание, 1976. — 288 с.
152. Современные методы оптимизации композиционных материалов / Вознесенский В.А., Выровой В.Н., Керш В.Я. и др.; Под ред. д-ра техн. наук В.А. Вознесенского. — Киев: Будівельник, 1983. — 144 с.
153. Леопольд В.И. Информация, используемая для управления процессом достижения точности размера детали при выполнении технологической операции на станках с ЧПУ. Автореферат диссертации ... канд. техн.

наук. Специальность 05.02.08. — Технология машиностроения. — М.: Станкин, 1983. — 21 с.

154. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. школа, 1982. — 256 с.

155. Кузнецов Н.Д. Обеспечение надежности современных авиадвигателей // Проблемы надежности и ресурса в машиностроении. — М.: Наука, 1986. — 248 с.

156. ГОСТ 16263-70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения. — М., 1970. — 54 с. — УДК 389: 001. 4. Группа ПОО.

157. Иванцов А.И. Основы теории точности измерительных устройств. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 212 с.

158. Kovalenko V.V., Preuschoft A., Radtschenko S.G. Anwendung der Methoden der mathematischen Versuchsplanung (MVP) auf Probleme der Abtrenntechnik // Die Technik. — 1979. — № 5. — S. 270-272.

159. Щедровицкий Г.П. Проблемы методологии системного исследования. — М.: Знание, 1964. — 48 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

160. Вейник А.И. Термодинамика реальных процессов. — Мн.: Наука и техника, 1991. — 576 с.

161. Глушков В. Как построить модель человека? / Беседу записал В. Моев // Лит. газ. — 1977. — 27 апр. — № 7. — С. 13.

162. Ткемаладзе Г.Н. Износостойкость инструмента и производительность нарезания резьбы на трубах нефтяного сортамента. (05.171 — теория обработки резанием). Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тбилиси, 1972. — С. 22.

163. Бусленко Н.П. К теории сложных систем // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. — 1963. — № 5. — С. 7 — 18.

164. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. — М.: Наука, 1988. — 480 с. (Физико-математическая б-ка инженера).

165. Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация. Пер. с англ. Т.А. Кузнецовой. Под ред. и с послесловием И.В. Кузнецова. — М.: Мир, 1966. — 272 с.

166. Сергеев Е.С. Диалектика научного познания и мышление инженера. — М.: Знание, 1966. — 29 с.

167. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложений математики. — М.: Наука, 1983. — 328 с.

168. Математика в современном мире. — М.: Мир, 1967. — 206 с.

169. Дубровский М. Закон разбитого термоса // Инженер. — 1991. — № 5. — С. 27.

170. Самарский А.А. Математическое моделирование — интеллектуальное ядро информатики // Современные проблемы прикладной математики и математической физики. — М.: Наука, 1988. — 224 с.

171. Пугачев В.С. [Выступление на годичном общем собрании Академии наук СССР] // Вестник Академии наук СССР. — 1987. — № 8. — С. 26—28.

172. Моисеев Н.Н. Человек, среда, общество. — М.: Наука, 1982. — 240 с.

173. Эшби У.Р. Системы и информация // Вопросы философии. — 1964. — № 7. — С. 78 — 84.

174. Русас Дж. Контигуальность вероятностных мер. Применения к статистике / Пер. с англ. А.И. Пинского. Под ред. Д.М. Чибисова. — М.: Мир, 1975. — 254 с.

175. Берталанфи Л. Общая теория систем: Критический обзор // Исследования по общей теории систем. — М.: Прогресс, 1969. — С. 23 — 82.

176. Ланге О. Целое и развитие в свете кибернетики // Исследования по общей теории систем. — М.: Прогресс, 1968. — С. 181 — 251.

177. Акофф Р. О природе систем // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1971. — С. 68 — 75.

178. Рапопорт А. Математические аспекты абстрактного анализа систем // Общая теория систем. — М.: Мир, 1966. — С. 83 — 105.

179. Ханика Ф. де П. Новые идеи в области управления. Руководство для управляющих / Пер. с англ. А.И. Гомана — М.: Прогресс, 1969. — 125 с.

180. Анохин П.К. Теория функциональной системы // Успехи физиологических наук. — 1970. — Т. 1. — № 1. — С. 19 — 54.

181. Колев К.С. Технология машиностроения. Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк. 1977. — 256 с.

182. Ковшов А.Н. Технология машиностроения: Учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов. — М.: Машиностроение, 1987. — 320 с.

183. Технология конструкционных материалов: Учеб. для машиностроительных специальностей вузов / А.М. Дальский, И.А. Арутюнова, Т.М. Барсукова и др.; Под общ. ред. А.М. Дальского. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1985. — 448 с.

184. Мельников Н.Ф., Бристоль Б.Н., Дементьев В.И. Технология машиностроения. Изд. 2-е перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1977. — 327 с.

185. Лавриненко М.З. Технология машиностроения и технологические основы автоматизации. — К.: Вища шк., 1982. — 320 с.

186. Технология машиностроения (специальная часть): Учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.А. Гусев, Е.Р. Ковальчук, И.М. Колесов и др. — М.: Машиностроение, 1986. — 480 с.

187. Разработка методики планирования и проведения многофакторного эксперимента для определения оптимальных условий получения точных наружных резьб при нарезании, накатывании и обкатывании резьбонарезны-

ми головками: Отчет о НИР за 1970 г. (заключительный) / Киев. политехн. ин-т; Руководитель Г.Э. Таурит — К., 1971. — 54 с.— Отв. исполн. С.Г. Радченко. — Рукоп. работа.

188. Кузнецов Ю.Н., Срибный Л.Н. Повышение эффективности токарных автоматов. — К.: Техника, 1989. — 168 с.

189. Калиткин Н.Н. Численные методы / Под ред. А.А. Самарского. — М.: Наука, 1978. — 512 с.

190. Кацев П.Г. Математико-статистические методы оптимизации процессов обработки резанием // Передовая технология и автоматизация управления процессами обработки деталей машин / Под общ. ред. д-ра техн. наук проф. А.А. Маталина. — Л.: Машиностроение. — 1970. — С. 36 — 43.

191. Вульф А.М. Резание металлов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, 1973. — 496 с.

192. Коваленко В.С. Лазерная технология: Учебник: — К.: Выща шк., 1989. — 280 с.

193. Применение лазеров в машиностроении: Монография / В.С. Коваленко, В.П. Котляров, В.П. Дятел. — К.: Выща шк., 1988. — 162 с.

194. Методика установления стойкостных зависимостей при нарезании резьбы метчиками и исходные данные для составления нормативов на режимы резбонарезания в углеродистых сталях / Под ред. д.т.н., проф. Г.И. Грановского. — М.: ВНИИ, 1969. — 46 с.

195. Дэвидсон К. Разные планеты или одна? // Поиск.1990. — 18 — 24 мая. — С. 3.

196. Дэвидсон К. Что случилось с советской наукой? // НТР Трибуна. — 1990. — № 11 — 12. — С. 5.

197. Гельфанд И.М., Цейтлин М.Л. О некоторых способах управления сложными системами // Успехи математических наук. — 1962. — Т. 17. — Вып. 1(103). — С. 3 — 6.

198. Эшби У.Р. Введение в кибернетику / Пер. с англ. Д.Г. Лахути. Под ред. В.А. Успенского. — М.: Изд. иностр. лит., 1959. — 432 с.

199. Современная технология проведения наукоемких исследований / Киев. политехн. ин-т; [Сост. С.Г. Радченко, С.Н. Лапач]. — К.: Час, 1991. — 4 с. — На рус. и англ. яз.

200. Прохоров А.В. Регрессия // Математическая энциклопедия / Гл. ред. И.М. Виноградов. — М.: Сов. энцикл. — Т. 4. — Ок — Сло. — 1984. — Стб. 929 — 931.

201. Айвазян С.А. Многомерный статистический анализ // Математическая энциклопедия / Гл. ред. И.М. Виноградов. — Т. 3. — Кооп—Од — М.: Сов. энцикл. — 1982. — Стб. 732 — 738.

202. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ / Пер. с болг. и предисл. Ю.П. Адлера. — М.: Финансы и

статистика, 1987. — 239 с. — (Б-чка иностр. книг для экономистов и статистиков).

203. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ / Пер. с англ. А.Ф. Кушнира, А.Л. Петросяна, Е.Л. Резникова. Под ред. В.Ф. Писаренко. — М.: Мир, 1981. — 695 с.

204. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Пер. с англ. под ред. Э.К. Лецкого. — М.: Мир, 1980. — 612 с.

205. Статистическое программное обеспечение — 1988 / Пер. с англ. В.Э. Фигурнова. — М.: Интерквадро, 1989. — VI, 77 с.

206. Радченко С.Г., Карпович Л.Г. Анализ точечной диаграммы показателя качества технологического процесса // Вест. машиностроения. — 1989. — № 10. — С. 48—49.

207. Тихонов А.Н. Математические модели и научно-технический прогресс (автоматизация обработки наблюдений) // Что такое прикладная математика. — М.: Знание, 1980. — 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. "Математика, кибернетика"; № 10).

208. Тихонов А.Н. [Выступление на годичном общем собрании Академии наук СССР] // Вестник Академии наук СССР. — 1989. — № 2. — С. 94—95.

209. Головина Л.И. Линейная алгебра и некоторые ее приложения. Учеб. пособие. — М.: Наука, 1971. — 288 с.

210. Гельфанд И.М. Лекции по линейной алгебре. Изд. 4-е, доп. — М.: Наука, 1971. — 272 с.

211. Жуковский Е.Л. Статистическая регуляризация решений обратных некорректно поставленных задач обработки и интерпретации результатов эксперимента // Методы математического моделирования, автоматизация обработки наблюдений и их применения: Сборник / Под ред. А.Н. Тихонова, А.А. Самарского. — М.: Изд-во МГУ, 1986. — С. 47—72.

212. Программа развития работ по математическому моделированию (основные направления исследований до 2000 года). Под ред. акад. А.А. Самарского. — М.: Б. и., 1985. — 51 с. (АН СССР. Отделение информатики, вычислительной техники и автоматизации. Научный совет по комплексной проблеме математическое моделирование).

213. Білецький А. Що врятує експеримент // Урядовий кур'єр. — 1994. — 22 вересня. — № 146—147 (441—442). — С. 9.

214. Оптимизация процессов заточки быстрорежущего инструмента кругами из кубонита / И.П. Захаренко, Е.И. Вал, Э.А. Ахундов, С.Г. Радченко // Синтетические алмазы. — 1976. — Вып. 2(44). — С. 53—57.

215. Радченко С.Г., Добрянский С.С. Оптимизация технологических условий нарезания наружных резьб винторезными самооткрывающимися головками по критерию точности // Вестн. машиностроения. — 1986. — № 1. — С. 56—59.

216. Коваленко В.В., Файзиматов Б.Н., Радченко С.Г. Оптимизация условий сверления титановых сплавов на станках с программным управлением // Оптимизация процессов механической обработки на металлорежущих станках. — К.: 1975. — С. 134–146.

217. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. — М.: Наука, 1976. — 224 с.

218. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Учебное пособие для ВУЗов. Изд. 3-е, исправленное. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 299 с.

219. Тихонов А.Н. Об обратных задачах // Некорректные задачи математической физики и анализа. — Новосибирск: Наука, 1984. — 264 с.

220. Hoerl A.E. Application of ridge analysis to regression problems // *Chemic. Engin. Progress.* — 1962. — vol. 58. — № 1. — pp. 54–59.

221. Hoerl A.E., Kennard R.W. Ridge regression: biased estimation for nonorthogonal problems // *Technometrics.* — 1970. — vol. 12.

222. Алгоритмы и программы восстановления зависимостей / Под ред. В.Н. Вапника. — М.: Наука, 1984. — 816 с. / Вапник В.Н., Глазкова Т.Г., Кошечев В.А., Михальский А.И., Червоненкис А.Я.

223. Райс Дж. Матричные вычисления и математическое обеспечение / Пер. с англ. О.Б. Арушаняна. Под ред. В.В. Воеводина. — М.: Мир, 1984. — 264 с.

224. Вальд А. Последовательный анализ // Пер. с англ. Под ред. Б.А. Севастьянова. — М.: Гос. изд. физ. мат. лит., 1960. — 328 с.

225. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. — М.: Машиностроение, 1966. — 264 с.

226. Матвеев В.В. Исследование точности обработки резьб метчиками. Резьбообразующий инструмент // Сб. докладов конференции по резьбообразующему инструменту / Под ред. к.т.н. К.Ф. Романова. — М.: Б. и., 1968. — С. 290–298.

227. Боровков А.А. Математическая статистика. Дополнительные главы: Учеб. пособие для вузов. — М.: Наука, 1984. — 144 с.

228. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. — 2-е изд. перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. — 304 с.

229. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. Пер. с англ. В.П. Носко. Под ред. М.Б. Малютова. — М.: Мир, 1980. — 456 с.

230. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. Пособие для вузов. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988. — 239 с.

231. Айвазян С.А. Программное обеспечение персональных ЭВМ по статистическому анализу данных: проблемы, тенденции, перспективы отечественных разработок // Компьютеры и экономика: экономические пробле-

мы компьютеризации общества. — М.: Наука, 1991. — 190 с. (Серия "Кибернетика — неограниченные возможности и возможные ограничения").

232. Многофакторная математическая модель термонапряженной электроизоляции / М.Е. Иерусалимов, С.А. Соколовский, С.Г. Радченко, Ю.В. Романенко, С.Н. Лапач // Электричество. — 1991. — № 8. — С. 40—45.

233. Разработка научно-методических основ и создание прогрессивной высокопроизводительной базы автоматизации промышленного эксперимента / Б.Н. Белоусов, Ф.Н. Горин, В.М. Египко, В.П. Зинченко, А.Д. Киселев, С.Г. Радченко, Н.В. Руденко, Ю.М. Туз. Т.1 (документы). Т.2, ч.1, ч.2, ч.3 (материалы работы). Дополнительные материалы к т.2. Аннотация / Киев. политехн. ин-т. К.: КПИ, 1994. — Рукоп. работа.

Т.2, ч.2 — 193 с.

234. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Наука, 1981. — 112 с.

235. Соболев И.М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб. — М.: Знание, 1985. — 32 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. "Математика, кибернетика"; № 2).

236. Радченко С.Г., Орлюк В.А., Лапач С.Н. Планирование имитационных экспериментов при моделировании и оптимизации технологической системы сборки многоэлементных конструкций // Математические методы планирования эксперимента в лабораторных и промышленных исследованиях: Тез. респ. науч.-практ. конф. 18—22 апр. 1989 г. — К., 1989. — С. 25—26.

237. Gawrysz A.P., Radczenko S.G., Orliuk W.A. Wieloczynnikowe modelowanie matematyczne modułowego montażu konstrukcji wieloelementowych // Technologia i automatyzacja montażu. 1996. — № 1(11). — S. 33—38. (ISSN 1230—7661)

238. Орлюк В.А. Технологическое обеспечение собираемости многоэлементных конструкций в условиях роботизированной сборки: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. — Защищена 13.11.89; Утв. 03.90; — К. 1989. — 273 с.: 42 ил. — Библиогр.: С. 201—212 (137 назв.).

239. Орлюк В.А. Технологическое обеспечение собираемости многоэлементных конструкций в условиях роботизированной сборки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 1989. — 16 с.

240. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. Пер. с англ. Под ред. Р.С. Гутера. Изд. 2-е, испр. М.: Наука, 1972. — 400 с.

241. Воеводин В.В. Линейная алгебра. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Наука, 1980. — 400 с.

242. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: Учеб. пособие для студ. вузов. — М.: Машиностроение, 1988. — 368 с.

243. Якобс Г.Ю., Якоб Э., Кохан Д. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации / Пер. с нем. — М.: Машиностроение, 1981. — 279 с.

244. Фёрстер Э., Рёнц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов / Пер. с нем. и предисл. В.М. Ивановой. — М.: Финансы и статистика, 1983. — 304 с.

245. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. — М.: Финансы и статистика, 1981. — 302 с.

246. Разработка и внедрение научно-технических программ оптимизации конструкции и технологии изготовления летательных аппаратов: Отчет о НИР № 709 за 1986—1991 гг. (промежуточ.) / Киев. политехн. ин-т; Руководитель С.Г. Радченко. — К., 1986. — Отв.исполн. С.Г. Радченко, С.С. Добрянский, С.Н. Лапач, А.П. Кругляк, Е.Я. Дубровская и др. — Рукоп. работа.

Ч.1. — 1986, — 103 с.; Ч.6. — 1988, — 102 с.

247. Оптимизация технологических условий сварки полиэтиленовых труб / С.Г. Радченко, Ю.С. Бурбело, Э.В. Котенко, С.Н. Лапач, Ю.А. Сидоренко, В.С. Лищинский // Пластические массы. — 1988. — № 9. — С. 29 — 31.

248. Грекова И. Методологические особенности прикладной математики на современном этапе ее развития // Вопросы философии. 1976. — № 6. — С. 104—114.

249. Радченко С.Г., Добрянский С.С. Методические рекомендации к самостоятельному изучению дисциплин "Основы научн. исслед. и техн. творчества", "Оптимизация и моделирование технол. процессов и объектов": Для студентов спец. "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" и слушателей ФПК / Киев. политехн. ин-т. — К.: КПИ, 1987. — 68 с.

250. Колмогоров А.Н. К обоснованию метода наименьших квадратов // Успехи математических наук. — 1946. — Т. 1. — Вып. 1. — С. 57—70.

251. Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ). SCMC-90; 325, 660, 668 // Каталог. Программные продукты Украины. Catalog. Software of Ukraine. — К.: СП "Текнор". — 1993. — С. 24—27.

252. Sokolovsky S.A., Romanenko J.V., Radchenko S.G. Dynamics of electric field in the polymer insulation of the electric apparatus during the thermal load // Seventh International Symposium on High Voltage Engineering, Drezden, August, 26—30, 1991. Subject 2. Solid, liquid and mixed insulating materials. Drezden, 1991. — P. 175—177.

253. Плюта В. Сравнительный многомерный анализ в эконометрическом моделировании / Пер. с польск. В.В. Иванова. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 175 с. — (Б-чка иностранных книг для экономистов и статистиков).

254. Анализ данных на ЭВМ (на примере системы СИТО) / В.В. Александров, А.И. Алексеев, Н.Д. Горский. — М.: Финансы и статистика, 1990. — 192 с. — (Мат. обеспечение прикладной статистики).

255. Приходько В.П., Радченко С.Г. Математическое моделирование влияния факторов процесса резбоформирования на стойкость гребенок //

Технология и автоматизация машиностроения. — К., 1981. — Вып.27. — С. 60 — 63.

256. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта: Пер. с франц. под ред. В.Л. Стефанюка. — М.: Мир, 1991. — 568 с.

257. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений / Пер. с англ. Х.Д. Икрамова. — М.: Мир, 1980. — 280 с.

258. Спрент П. Как обращаться с цифрами, или статистика в действии / Пер. с англ. А.Ф. Якубова. — Мн.: Высш. шк., 1983. — 271 с.

259. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия: В 2-х вып. Вып. 2 / Пер. с англ. Б.Л. Розовского; Под ред. и с предисл. Ю.П. Адлера. — М.: Финансы и статистика, 1982. — 239 с. (Математико-статистические методы за рубежом).

260. Лалач С.Н., Радченко С.Г. Программное средство ПРИАМ // Математические методы планирования эксперимента в лабораторных и промышленных исследованиях: Тез. докл. респ. научн.-практ. конф. 21–23 мая 1991 г., г. Киев. — К., 1991. — С. 25.

261. Математическое моделирование шестикомпонентных тензометрических измерительных систем: Техн. отчет № 486 / Киев. мех. з-д; Киев. политехн. ин-т; Руководитель С.Г. Радченко — К., 1979. — 42 с. — Отв. исполн. В.П. Зинченко, С.Г. Радченко. — Рукоп. работа.

262. Радченко С.Г., Добрянский С.С. Оптимизация и моделирование технол. процессов и объектов: Метод. указания к практ. занятиям по дисциплине "Осковы научн. исследований" для студентов спец. 0501 / Киев. политехн. ин-т. — К.: КПИ, 1981. — 48 с.

263. Лалач С.Н., Радченко С.Г., Литвинчук Н.И. Пакет прикладных программ ПРИАМ. — К., 1988. — 4 с. — (Информ. листок о науч.-техн. достижениях / УкрНИИНТИ. Киев. отд-ние; № 88-007).

264. Пакет прикладных программ ПРИАМ / Киев. политехн. ин-т; [Сост. С.Н. Лалач, С.Г. Радченко]. — К.: Час, 1990. — 4 с. — На рус. и англ. яз.

265. Лалач С.Н., Радченко С.Г. Сквозная автоматическая технология обработки результатов экспериментов (ППП ПРИАМ) // Применение вычислительной техники и математических методов в научных исследованиях. — К., 1986. — С. 133–135.

266. Мосин И. Математический советчик. Уникальный пакет прикладных программ для совершенствования самых различных технологий разработан учеными Киевского политехнического института // Деловой мир. — 1992. — № 171. — 5 сент. — С. 12.

267. Лалач С.Н., Радченко С.Г. ППП ПРИАМ — индустриальная технология обработки регрессионных экспериментов // Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Перспективы и опыт внедрения статистических методов в АСУТП". — Тула, 1987. — С. 52–53.

268. Эйнштейн А. Геометрия и опыт // Собрание научных трудов. Т.2. — М.: Наука, 1966. — 879 с.
269. Кэрнс Д. Борьба против рака // В мире науки. — 1986. — № 1. — С. 4 — 13.
270. Никифоров А. Профессиональная статистика на ПК // Компьютер. Сб. статей. — 1991. — Вып. 2(5). — С. 34 — 36.
271. Лапач С.Н., Радченко С.Г. Использование методов регрессионного анализа в системах автоматизированного проектирования // Программные системы в автоматизации проектирования изделий машиностроения: Тез. докл. науч.-практ. семинара. 18—20 мая 1988 г. — Ижевск, 1988. — С. 44 — 46.
272. Лапач С.Н., Радченко С.Г. Система для накопления и использования информации об экспериментальных исследованиях // Применение вычислительной техники и математических методов в научных и экономических исследованиях: Тез. докл. науч.-техн. конф. — К., 1988. — С. 140—142.
273. Равская Н.С., Кикоть В.С., Мирзахмедов Н.Т. Исследование процесса обработки криволинейных поверхностей торцовыми фрезами // Резание и инструмент. — 1986. — Вып. 35. — С. 43—54.
274. Проблемы развития технологии машиностроения / Под ред. д-ра техн. наук Э.А. Сателя. М.: Машиностроение, 1967. — 592 с.
275. Проников А.С. Надежность машин. — М.: Машиностроение, 1978. — 592 с. — (Межиздательская серия "Надежность и качество").
276. Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. статей. Вып. 6 / Отв. ред. Г.Л. Хаэт. — Краматорск: ДГМА, 1996. — 300 с.
277. Радченко С.Г., Белоненко В.Г., Лапач С.Н. Стохастические модели объектов и процессов технологии машиностроения // Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. "Современные проблемы технологии машиностроения" (Москва, 29—31 янв. 1986 г.). — М., 1986. — С. 12.
278. Радченко С.Г. Математическое моделирование и оптимизация сложных технических и технологических систем // Типовые механизмы и технологическая оснастка станков-автоматов, станков с ЧПУ и ГПС ("СТАНКИ — 91"): Сб. тез. докл. конф. 14—15 мая 1991 г., г. Чернигов. — К., 1991. — С. 69—70.
279. Уданович М.Р., Проскурнин А.Ф., Радченко С.Г. Многофакторное исследование конструкции, технологии изготовления, упрочнения и эксплуатации мелкоразмерных твердосплавных сверл // Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. "Пути повышения стойкости и надежности режущих и штамповых инструментов". — Николаев, 1990. — С. 25—26.
280. Уданович М.Р., Муха И.М., Радченко С.Г. Качество отверстий в печатных платах позиций комплексного подхода // Техника средств связи. Сер. Технология пр-ва и оборуд. (ТПО). — 1990. — Вып. 2. — С.11—15.

281. Уданович М.Р., Проскурнин А.Ф., Радченко С.Г. Системный анализ факторов обеспечения точных отверстий в печатных платах / Техника средств связи. Сер. Технология производства и оборудование: Науч.-техн. сб. — 1991. — Вып. 2. — С. 15—20.

282. Разработать установку для изготовления сварных соединительных деталей и узлов трубопроводов из полиэтиленовых труб диаметром 250—315 мм : Отчет о НИР (заключительный) / ВНИИМонтажспецстрой. Киев. фил.; Руководитель С.Г. Радченко. — № ГР 01820084480; Инв.№ 02850066993. — К., 1985. — 58 с. — Отв. исполн. С.Г. Радченко и др.

283. Радченко С.Г., Лапач С.Н., Сидоренко Ю.А. Оптимизация технологических условий сварки полиэтиленовых труб // Математические методы планирования эксперимента в лабораторных и промышленных исследованиях: Тез. респ. науч.-практ. конф. 18—22 апр. 1989 г. — К., 1989. — С. 44.

284. Бурбело Ю.С., Сидоренко Ю.А., Радченко С.Г. Исследование контактно-стыковой сварки труб из поливинилхлорида (ПВХ-100) // Монтаж технологического оборудования и трубопроводов и средства для его осуществления: Сб. науч. тр. / ВНИИМонтажспецстрой. — М., 1982. — С. 163—173.

285. Радченко С.Г. Информационное обеспечение многокомпонентных датчиков систем контроля и управления // Тез. докл. к Всесоюз. конф. "Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления". 21—23 янв. 1986 г. — Пенза, 1986. — С. 145—147.

286. Зинченко В.П., Радченко С.Г. Метод моделирования многокомпонентных тензометрических измерительных систем. — К., 1993. — С. 16. (Препр. / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова; 93 — 31).

287. Дикке Р. Гравитация и Вселенная / Пер. с англ. — М.: Мир, 1972. — 98 с.

288. Луна управляет циклотроном. Пресс-реализ ЦЕРНа // Наука и жизнь. — 1993. — № 4. — С. 27.

289. Рыбаков И.Н. Основы точности и метрологического обеспечения радиоэлектронных измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 180 с.

290. Алимов Ю.И., Шаевич А.Б. Методологические особенности оценивания результатов количественного химического анализа // Журнал аналитической химии. — 1988. — Вып. 10. — Т. XLIII. — С. 1893 — 1916.

291. Математическое моделирование трехкомпонентных тензометрических весов с использованием теории планирования эксперимента: Техн. отчет (заключительный) / Киев. мех. з-д; Киев. политехн. ин-т; Руководитель С.Г. Радченко. — № 548. — К., 1980. — 66 с. — Отв.исполн. В.П. Зинченко, С.Г. Радченко, Н.П. Зинченко, В.А. Больгер. — Рукоп. работа.

292. Радченко С.Г. Математическое моделирование многокомпонентных измерительных систем // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Современные проблемы технологии машиностроения" (Москва, 29—31 янв. 1986 г.). — М.; 1986. — С.161.

293. Радченко С.Г. Многофакторное математическое моделирование средств измерений и измерительных информационных систем // Тез. докл. Международной науч.-техн. конф. "Метрологическое обеспечение машиностроительных отраслей промышленности" (Минск, 8-10 сент. 1992 г.). - Минск, 1992. - С. 25.

294. Радченко С.Г. Многофакторное математическое моделирование электронных средств измерений и измерительных информационных систем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 1993. - № 2. - С. 26-28.

295. Новейшие разработки датчиков. New technology for sensor development / Keeve Alan // Contr. and Instrum.- 1989.- 21. № 12. - С. 53, 55-56. (РЖ автоматика и вычислительная техника. - 1990. - 10A19).

296. Современное состояние и тенденция развития интеллектуальных датчиков / Kawashima Yoshichi, Yoshino Yoshimi // Найнэн кикан = Intern. Combust. Engine. - 1989. - 28.- № 1. - С. 22 - 30.- Яп. (РЖ автоматика и вычислительная техника.- 1989.- 6A216).

297. Дементьев Г.П. и др. Физико-технические основы создания и применения космических аппаратов. - М.: Машиностроение, 1987. - с.

298. Mehrfaktorenalterung der polymeren isolation von Hochspannungsumformern / M. Ierusalimov et al.- Technische universitat Dresden, II Wissenschaftliche Konf. der Sektion Elektrotechnik mit internationaler Beteiligung, 10-12 Nov. 1987, Themengruppe H, N HI-II, S. 35-37.

299. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). - М.: Госфизматиздат, 1958. - 907 с.

300. Соколовский С.А., Романенко Ю.В. Математическая модель термонапряженной электроизоляции в динамическом режиме // Техническая электродинамика. - 1990. - № 4. - С. 15-19.

301. Соколовский С.А., Радченко С.Г., Романенко Ю.В. Моделирование высоковольтной термонапряженной изоляции электроаппаратов на основе обобщенных факторов // Всесоюз. науч.-техн. конф. "Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной, сильноточной и полупроводниковой техники: Тез. докл., 29 янв.-2 февр. 1990 г. - М.: ВЭИ, 1989. - Ч.1. - С. 7-8.

302. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения: Учеб. для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1977. - 368 с.

303. Оптимизация режимов обработки жаропрочных никелевых сплавов инструментом из сверхтвердых материалов: Отчет о НИР (заключительный) / Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР; Киев. центр науч.-техн. творчества "Прогресс"; Руководитель С.Г. Радченко. - К., 1988. - 62 с.- Отв. исполн. С.Г. Радченко, С.Н. Лапач, П.Е. Дальник и др. - Рукоп. работа.

304. Гриценко Э.И., Радченко С.Г., Дальник П.Е. Математическое моделирование и оптимизация условий обработки высокожаропрочных никелевых сплавов // Математические методы планирования эксперимента в лабораторных и промышленных исследованиях: Тез. респ. науч.-практ. конф. 18–22 апр. 1989 г. — К., 1989. — С. 39–40.

305. Повышение стойкости инструмента из кубического нитрида бора при точении никелевых сплавов / Э.И. Гриценко, С.Г. Радченко, П.Е. Дальник, С.Н. Лапач // Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. "Пути повышения стойкости и надежности режущих и штамповых инструментов". — Николаев, 1990. — С. 6–7.

306. Гриценко Э.И., Дальник П.Е., Чапалюк В.П. Точение никелевых сплавов инструментом из кубического нитрида бора; АН Украины. Ин-т сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля.— К.: Наук. думка, 1993.— 108 с.

307. Методические рекомендации и материалы по самостоятельному изучению дисциплины "Математическое моделирование и оптимизация техн. систем" для студентов спец. "Технология машиностроения" и слушателей ФПК / Киев. политехн. ин-т; Сост. С.Г. Радченко, С.Н. Лапач, П.Н. Бабич, С.В. Киларева. — К., 1989. — 49 с. — Рукоп. работа.

308. Радченко С.Г., Фенчак В.В. Математическое моделирование композиционных материалов по критериям нарушения сплошности при импульсных нагрузках и механическим характеристикам // Сопrotивление материалов и теория сооружений. — 1984. — Вып.44. — С. 93 — 96.

309. Радченко С.Г. Разработка планов экспериментальных работ и проведение расчетов по исследованию композиционных материалов // Перечень научно-технических разработок, выполненных преподавателями, сотрудниками и студентами Киевского политехнического института: Метод. рекомендации по внедрению. — К., 1990. — С. 57.

310. Триботехнология формирования поверхностей / И.Х. Чеповецкий, С.А. Ющенко, А.В. Бараболя и др.; АН УССР. Ин-т сверхтвёрдых материалов.— К.: Наук. думка, 1989. — 232 с. (Наука и техн. прогресс).

311. Кравченко М.А., Ларин В.К., Радченко С.Г. Термическая обработка алюминиевых бронз, обладающих эффектом заломинания формы // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1990. — № 12. — С. 37 — 40.

312. Радченко С.Г. Устойчивое оценивание коэффициентов уравнения регрессии в условиях мультиколлинеарности факторов // Применение вычислительной техники и математических методов в научных исследованиях. — К., 1986. — С. 84–86.

313. Радченко С.Г., Лапач С.Н. Высокоэффективная технология решения прикладных задач экспериментально-статистическими методами // Математические методы планирования эксперимента в лабораторных и промышленных исследованиях: Тез. докл. респ. науч.-практ. конф. 21–23 мая 1991 г., г.Киев. — К., 1991. — С. 24–25.

314. Маркс К. Машины. Применение природных сил и науки: Из рукописи 1861—1863 гг. / Подготовил С.М. Григорьян при участии А.А. Кузина // Вопросы естествознания и техники. — 1968. — Вып. 25. с. 3—78.
315. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование сложных систем. — К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. — 359 с.
316. Меликов А.З., Молчанов А.А. Оптимизация процесса запасаения ресурсов в транспортно-складских системах // Кибернетика и системный анализ. — 1992. — № 3. — С. 179—183.
317. Качество продукции автоматизированного машиностроительного производства / А.С. Зенкин, И.В. Петко, Н.П. Стародуб, В.Д. Мельниченко. — К.: Техника, 1988. — 175 с.
318. Радченко С.Г., Лалач С.Н. Высокая технология совершенствования выпускаемой продукции // Жизнь и компьютер: Первый Всесоюз. науч.-практ. семинар по автоматизации инж. труда, 19 — 25 нояб. 1990 г. — Харьков, 1990. — С. 183—188.
319. Краснов Ю.К. Формула прогресса: Наука и передовой опыт производству. — М.: Политиздат, 1983. — С. 78. — (Сер. "Резервы эффективности").
320. Альтшуллер Г.С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач / Отв. ред. А.К. Дюнин. — Новосибирск: Наука, 1986. — 209 с.
321. Саламатов Ю.П. Система развития законов техники // Шанс на приключение / Сост. А.Б. Селюцкий. — Петрозаводск: Карелия, 1991. — 304 с. — (Техника — молодежь — творчество).
322. Комплексный подход к автоматизированной обработке экспериментальных данных при исследовании свойств материалов / С.Н. Лалач, Н.И. Литвинчук, С.Г. Радченко, Л.Н. Ткаченко // III Всесоюз. конф. по пробл. получения и исполыз. в нар. хоз-ве данных о свойствах материалов и веществ: Прогр. и тез. докл. 25—27 авг. 1987 г. / Гос. ком. СССР по стандартам; Всесоюз. науч.-исслед. центр по материалам и веществам. — М., 1987. — С. 98—99.
323. Кравченко М.А., Радченко С.Г., Григорьян М.В. Математическое моделирование технологии получения прецизионных сплавов // Проблемы кристаллизации сплавов и компьютерное моделирование: Тез. Всесоюз. науч.-техн. конф. — Ижевск, 1990. — С. 79—80.
324. Разработка и внедрение методики испытания агрегатов и узлов на основе методов математической теории планирования эксперимента: Отчет о НИР № 967 за 1975—1983 гг. (промежуточ.) / Киев. политехн. ин-т; Руководитель С.Г. Радченко. — № ГР 79019395; Инв. № 02830053163. — К., 1983. — 96 с. — Отв. исполн. С.Г. Радченко, С.С. Добрянский, Е.С. Пуховский, А.В. Сердюк.
325. Радченко С.Г., Лалач С.Н. Оптимизация и математическое моделирование технологических процессов вибрационной обработки деталей ма-

шин // Тез. докл. респ. науч.-техн. конф. "Проблемные вопросы создания средств вибрационной техники для использования в различных технологических процессах машиностроительной отрасли Узбекистана, 19–20 июня 1990 г., г. Ташкент. — Ташкент, 1990. — С. 54–55.

326. Радченко С.Г., Добрянский С.С., Приходько В.П. Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине "Основы научн. исслед. и техн. творчества" для студентов спец. 0501 "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" / Киев. политехн. ин-т. — К.: КПИ, 1984. — 35 с.

327. Методические указания к изучению дисциплины "Основы научн. исслед. и техн. творчества" для студентов спец. "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" и слушателей ФПК / А.П. Кругляк, В.В. Душинский, С.Г. Радченко, Е.С. Пуховский, В.Г. Беланенко; Киев. политехн. ин-т. — К.: КПИ, 1987. — 78 с.

328. Методические рекомендации по планированию эксперимента и статистической обработке его результатов в механике деформируемого твердого тела / Сост. В.А. Стрижало, С.Г. Радченко, С.Н. Шуклаев; Киев. политехн. ин-т. — К.: КПИ, 1988. — 40 с.

329. Винер Н. Я — математик. Изд. 2-е. Пер. с англ.— М.: Наука, 1967. — 356 с.

330. Радченко С.Г., Лапач С.Н. Универсальная высокая технология решения разнообразных научных, технических, технологических задач // Высокие технологии в машиностроении: Международный научно-технический семинар, 27 сентября — 2 октября 1995 г. — Харьков — ХГПУ — Алушта, 1995. — С. 106–109.

331. Немчинов В.С. Полиномы Чебышева и математическая статистика. — М.: Изд. Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева, 1946. — 136 с.

332. Хикс Ч.Р. Основные принципы планирования эксперимента/Пер. с англ. Под ред. В.В. Налимова. — М.: Мир, 1967. — 406 с.

333. Смит Д.М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей / Пер. с англ. Н.П. Ильиной; Под ред. О.А. Чембровского. — М.: Машиностроение, 1980. — 271 с.

334. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. Изд. 3-е. — М.: Наука, 1983. — 416 с.

Именной указатель

- Аваков А.А. 43, 241
Аддельман С. 115
Адлер Ю.П. 238, 239, 240, 241, 247, 252
Айвазян С.А. 44, 108, 173, 247, 249
Акоф Р.Л. 77, 239, 246
Александров В.В. 251
Алексеев А.И. 251
Алимов Ю.И. 254
Алтаев В.Я. 239
Альтшуллер Г.С. 30, 257
Андерсон Т. 44
Анисимов С.А. 243
Анохин П.К. 77, 246
Аристотель 31, 64, 37
Арсенин В.Я. 249
Арсеньев Ю.Д. 243
Артоболевский И.И. 24, 64, 78, 237, 244
Арутюнова И.А. 246
Арцимович Л.А. 241
Аршинов В.И. 238
Афанасьев П.А. 41
Ахундов Э.А. 248
- Бабич П.Н. 175, 256
Базров В.М. 44, 243
Балакшин В.С. 22, 48, 236
Бараболя А.В. 256
Барашенков В. 240
Бармин Б.П. 244
Барсукова Т.М. 246
Безпрозванный И.М. 43
Беланенко В.Г. 258
Белл Ф.Дж. 36, 239
Беллман Р. 61
Белоненко В.Г. 253
Белоусов Б.Н. 250
Берман Дж. 115
Берталанфи Л. 77, 246
- Беспалько В.Н. 237
Бир Ст. 77, 88, 239
Вілецький А. 248
Блехман И.И. 245
Влох А. 243
Бобров В.Ф. 238
Большер В.А. 254
Большев Л.Н. 258
Воровков А.А. 249
Бородачев Н.А. 44, 82, 243
Бородюк В.П. 44
Боус А. 243
Бояджиева Л. 247
Братухин А. 237
Вриллюэн Л. 71, 139, 156, 245
Бристоль Б.Н. 246
Бродский В.З. 115, 249
Булах Ю. 235
Бурбело Ю.С. 240, 251, 254
Бурмистенко В.М. 244
Бусленко Н.П. 44, 69, 245
Буш Г. 30
Бэкон Р. 13
Бэкон Ф. 13
- Вайтинг Ч. 30
Вал Е.И. 248
Вальд А. 101, 249
Вапник В.Н. 44, 168, 249
Варьгин В.Н. 241
Веденский В.А. 244
Вейль Г. (H. Weyl) 121
Вейник А.И. 245
Веллер Р. 235
Вентцель Е.С. (Грекова И.) 156, 245, 251
Виндельбанд В. (Windelband W.) 33
Винер Н. 36, 258
Виноградов И.М. 247
Витрувий (Vitruvius) Поллионом Марк 139
Воеводин В.В. 249, 250

Вознесенский В.А. 44, 64, 244
Волчкевич Л.И. 40, 240, 242
Ву С.М. (Wu S.M.) 43, 241
Вульф А.М. 42, 63, 82, 241,
247
Вучков И.Н. 44, 247
Выровой В.Н. 244

Гаврилов А.Н. 40, 44, 78, 237
Гавриш А.П. (Gawrysz A.P.)
250

Галей М.Т. 243
Галилей 33
Галловой Д.Ф. (Galloway, D.F.)
56

Гельфанд И.М. 84, 89, 247, 248
Глазкова Т.Г. 249
Гличев А.В. 237
Глушков В.М. 44, 68, 245
Гнеденко Б.В. 177
Голикова Т.И. 107, 241
Головина Л.И. 248
Гордиенко Б.И. 244
Гордон В. 30
Горин Ф.Н. 250
Горский В. 239
Горский Н.Д. 251
Грановский Г.И. 83, 238, 247
Грановский Ю.В. 240
Григорян М.В. 257
Грицаенко Ю.А. 62, 244
Гриценко Э.И. 256
Громов Г.Р. 235
Грудов А.А. 83
Гузенко В.С. 241
Гусев А.А. 246
Гутер Р.С. 250

Дальник П.Е. 255, 256
Дальский А.М. 246
Данелян Р.Г. 242
Данилевский В.В. 48, 242
Дементьев В.И. 246
Дементьев Г.П. 255
Демиденко Е.З. 44, 140, 251
Джонсон Н. 86, 173, 248
Дикке Р. 254

Добрянский С.С. 236, 237, 240,
248, 251, 252, 257, 258
Дрейпер Н. 44
Дубровская Е.Я. 251
Дубровский М. 245
Душинский В.В. 243, 258
Дынькин В.Н. 243
Дэвидсон К. 247
Дятел В.П. 247

Египко В.М. 250
Елисеева И.И. 239
Ермаков Ю.М. 239

Жданов Ю. 239
Жебровский К.И. 43
Жилис В.И. 55, 243
Жук К.Д. 244
Жуковский Е.Л. 248

Заводян А.В. 239
Заде Л.А. 22, 236
Захаренко И.П. 248
Захаров С.Д. 240
Зверев К.Е. 43
Зворыкин К.А. 41
Зенкин А.С. 257
Зинченко В.П. 250, 252, 254
Зинченко Н.П. 236
Зограф И.А. 107, 249
Зорев Н.Н. 238

Иванцов А.И. 245
Ивахненко А.Г. 44, 60
Ивченко Г.И. 245
Иерусалимов М.Е. 250
Илей Л. 239
Исикава К. 23, 237
Иплинский А.Ю. 18, 235

Йетс Ф. 115

Каазик Ю.Я. 244
Кадомцев Б. 244
Калиткин Н.Н. 110, 247
Кант И. 36, 239
Капустин Н.М. 44

- Карпович Л.Г. 248
 Касавин А.Д. 243
 Касьянов А.И. 241
 Кацев П.Г. 44, 82, 247
 Каштанов В.А. 245
 Кендалл М.Дж. 44
 Кеннард Р. (Kennard R.W.) 249
 Керш В.Я. 244
 Кизеветтер В.Е. 255
 Кикоть В.С. 253
 Киларева С.В. 256
 Киселев А.Д. 250
 Клейнен Дж. 42, 241
 Клир Дж. 243
 Клушин М.И. 22, 39, 61, 69,
 75, 236
 Коваленко В.В. (Kovalenko
 V.V.) 245
 Коваленко В.С. 82, 247
 Коваленко И.Н. 245
 Коваленко В.В. 249
 Ковальчук Е.Р. 246
 Кован В.М. 238
 Ковшов А.Н. 246
 Колдинг Н.В. (Colding N.B.)
 43, 241
 Колев К.С. 246
 Колесов И.М. 246
 Колмогоров А.Н. 71, 251
 Конфуций 31
 Королькевич В.А. 239
 Корсаков В.С. 24, 76, 78, 238,
 242
 Косилова А.Г. 238
 Котенко Э.В. 251
 Котляров В.П. 247
 Коуэн Т.А. 26, 238
 Кохан Д. 238, 250
 Коханов Е.Ф. 244
 Кочерин Е.А. 240
 Кошкин Л.Н. 242
 Кошчев В.А. 249
 Кравченко М.А. 256, 257
 Крапивин С.П. 237
 Краплин М.А. 244
 Краснов Ю.К. 257
 Кривоухов В.А. 43, 44, 241
 Кругляк А.П. 175, 251, 258
 Крылов А.Н. 42, 241
 Кудинов В.А. 62, 244
 Кудрявина Т.А. 244
 Кузнецов В.Д. 41, 240
 Кузнецов И.В. 245
 Кузнецов Н.Д. 65, 83, 179, 245
 Кузнецов Ю.Н. 59, 243, 247
 Кузьмин В.И. 77
 Курант Р. 75
 Курапов А.Н. 62, 244
 Курицын А.Н. 242
 Кутюра Л. (Couturat L.) 33
 Кухтенко А.И. 44
 Кучинский Г.С. 255
 Кэрнс Д. 177, 253
 Лаврентьев М.А. 27, 238
 Лаврентьев М.М. 95
 Лавриненко М.З. 246
 Ланге О. 77, 246
 Лановой В.Т. 23, 236
 Лапач С.Н. 175, 236, 247, 250,
 251, 252, 253, 254, 255, 256,
 257, 258
 Лаплас П.С. 61, 244
 Ларин В.К. 256
 Ларин М.Н. 238
 Ле Шателье, 58, 72
 Левенстерн Л.А. 240
 Легасов В. 242
 Леопольд В.И. 64, 244
 Лецкий Э.К. 240, 248
 Линник Ю.В. 44, 62, 244
 Лион Ф. 86, 173, 248
 Лисенков А.Н. 115, 237
 Лисичкин В. 235
 Литвинчук Н.И. 252, 257
 Лихобабин В.И. 243
 Лихтенштейн Е.С. 241
 Лищинский В.С. 251
 Лобанов Д.В. 43
 Лопатников Л.И. 238
 Лоренц Е.Н. 61
 Лорьер Ж.-Л. 252
 Лоэв М. 243
 Львовский Е.Н. 249

Макаров А.Д. 103, 249
Макаров В.Л. 235
Максвелл Д.К. 48
Малахова А.М. 236
Малькольм М. 252
Малютов М.Б. 30, 239, 249
Маркова Е.В. 115, 240
Маркс К. 212, 235, 238, 257
Марчук Г.И. 236
Маслов В.П. 75
Маталин А.А. 24, 49, 78, 237, 242
Матвеев В.В. 104, 249
Матвиенко В.А. 237
Меликов А.З. 257
Мельников Н.Ф. 246
Мельниченко В.Д. 257
Мерзлюк В.В. 237
Меррифилд В. 50
Минский М. 173
Мирзахмедов Н.Т. 253
Михайлов В. 235
Михалевич В.С. 44
Михальский А.И. 249
Моисеев Н.Н. 44, 76, 239, 246
Мойзых М.М. 237
Молчанов А.А. 257
Мосин И. 252
Мостеллер Ф. 44, 252
Моулер К. 252
Муха И.М. 253
Мышкис А.Д. 245
Мюллер И.А. 44

Налимов В.В. 40, 44, 107, 240, 241, 258
Нейман Дж. фон, 19, 98, 177
Немчинов В.С. 258
Неуймин Я.Г. 236
Никифоров А. 253
Новик И.В. 239
Новицкий П.В. 107, 249
Новожилов В.В. 37, 239
Ньютон И. 97

Обвинцев В.И. 240

Овчаров Л.А. 245
Огурек О.Н. 237
Оккам У. 96
Ом Г.С. 42
Орлюк В.А. 127, 128, 250
Орлюк В.А. (Orliuk W.A.) 250
Осборн А. 30

Панкин А.В. 240
Пановко Я.Г. 245
Пасечник А.К. 175
Патон В.Е. 18, 48, 51, 235, 242
Пенькова Е.М. 242
Перегудов Ф.И. 26, 238
Петко И.В. 257
Пилдич Дж. 242
Пинтель Ю.С. 255
Писаренко В.Ф. 248
Плакетт Р. 115
Платон 31, 33
Плошко В.Г. 239
Плюта В. 251
Подобедов В.А. 237
Позняков Е.И. 237
Половинкин А.И. 30, 139, 250
Попов Ю.П. 238
Португал В.М. 236
Поспелов Д.А. 235
Пригожин И.Р. 27, 60, 238
Приходько В.П. 251, 258
Пройшофт А. (Preuschoft A.) 245
Проников А.С. 179, 253
Проскурнин А.Ф. 253, 254
Прохоров А.В. 247
Пуанкаре А. 13
Пугачев В.С. 75, 173, 246
Пуховский Е.С. 236, 243, 257, 258

Равская Н.С. 44, 241, 253
Радченко С.Г. 236, 237, 240, 243, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258
Радченко С.Г. (Radzenko S.G.) 250

- Радченко С.Г. (Radtschenko S.G.) 245
 Радченко С.Г. (Radchenko S.G.) 251
 Райбман Н.С. 44, 243
 Райс Дж. 97, 249
 Рао С.Р. 44
 Рапопорт А. 77, 246
 Рассел Б. 76
 Рёнц Б. 44, 251
 Резников Н.И. 43
 Риккерт Г. 33
 Риттер Х. (Ritter Н.) 243
 Роде Д.В. 244
 Роджерс Э. 241
 Родин П.Р. 44, 241
 Розенблют А. 36
 Романенко Ю.В. 250, 255
 Романенко Ю.В. (Romanenko J.V.) 251
 Романов К.Ф. 249
 Руденко Н.В. 250
 Рудник С.С. 42, 43, 240
 Русас Дж. 246
 Рыбаков И.Н. 254
- Саламатов Ю.П. 257
 Самарский А.А. 21, 26, 38, 44, 75, 93, 97, 199, 236, 238, 239, 242, 246, 247, 248
 Самуэльсон, 58, 72
 Сасиени М.В. 239
 Сассен Дж. 242
 Сатель Э.А. 179, 253
 Себер Дж. 44, 239, 249
 Севастьянов Б.А. 249
 Сергеев Е.С. 245
 Сердюк А.В. 257
 Сигорский В.П. 238
 Сидоренко А.В. 240
 Сидоренко Ю.А. 251, 254
 Сидоров А.И. 26, 31, 139, 238
 Сизенов Л.К. 44
 Силин А.А. 26, 238
 Синопальников В.А. 62, 244
 Скалли Д. 53
 Сканави Г.И. 255
- Скотт П. 242
 Скурихин В.И. 44
 Слободяник П.Т. 240
 Смирнов Н.В. 258
 Смит Г. 44
 Смит Д.М. 258
 Соболев В.В. 23, 236
 Соболев И.М. 250
 Соколовский А.П. 28, 34, 49, 238, 242
 Соколовский С.А. 250, 255
 Соколовский С.А. (Sokolovsky S.A.) 251
 Солаков Е. 247
 Спрент П. 173, 252
 Срибный Л.Н. 247
 Стариков Л.М. 237
 Стародуб Н.П. 257
 Статников Р.Б. 250
 Стенгерс И. 238
 Стендаль (Бейль А.М.) 35
 Стефанюк В.Л. 252
 Стогний А.А. 20
 Стрижало В.А. 258
 Стьюарт А. 44
- Тагути Г. 51
 Таурит Г.Э. 237, 240, 243, 247
 Тейлор Ф.У. 41, 42, 74, 86, 87, 240
 Тиме И.А. 41
 Тихонов А.Н. 89, 93, 95, 99, 236, 248, 249
 Ткаченко Л.Н. 257
 Ткемаладзе Г.Н. 245
 Трошин Д.М. 236
 Тугов И.И. 240
 Туз Ю.М. 250
 Тьюки Дж. 44, 85, 248, 252
- Уданович М.Р. 253, 254
 Усов А.В. 44, 240
 Успенский В.А. 247
- Файзиматов Б.Н. 249
 Фаруки А.М. 242
 Фёрстер Э. 44, 251

Фенчак В.В. 256
Филин А.П. 239
Финни Д. 115
Фишер (Fischer J.) 243
Фишер Р.А. 39, 93, 115
Флёров Г.Н. 38, 240
Флейшман Б.С. 235
Форсайт Дж. 252
Фролов В.К. 237
Фролов К.В. 34, 239

Хаэт Г.Л. 44, 241, 253
Хаэт Л.Г. 241
Ханика Ф. 77, 246
Харрингтон Дж.Х. 235
Хартман К. 240
Хёрл А. (Hoerl A.E.) 95, 249
Хемминг Р.В. 133, 140, 250
Хикс Ч.Р. 240, 258
Хусу А.П. 62, 244

Цветов В.Я. 235
Цвикки Ф. 30
Цейтлин М.Л. 84, 247
Цуравски К. 235
Цыпкин Я.З. 26, 60, 238

Чапалюк В.П. 256
Чебышев П.Л. 225, 237
Челюсткин А.Б. 239

Чембровский О.А. 258
Чеповецкий И.Х. 256
Червоненкис А.Я. 249
Четвериков С.С. 61, 244
Чупров А.А. 29, 33, 34, 239

Шабат Б.В. 238
Шаевич А.Б. 254
Шальнев А. 237
Шергин С.А. 235
Шефер В. 240
Шмелев Н. 242
Шукаев С.Н. 258
Шустер Г. 244

Щедровицкий Г.П. 245

Эйкхофф П. 44
Эйлоарт Т. 30
Эйнштейн А. 61, 177, 253
Эльясберг П.Е. 158, 240
Эшби У.Р. 76, 84, 246, 247

Ющенко С.А. 256

Явелов Б.Е. 240
Якимов А.В. 240
Якоб Э. 238, 250
Якобс Г.Ю. 238, 250

Предметный указатель

Алгоритм RASTA 141

—использование 160

—типичные классы задач 151

—устойчивость коэффициентов
154

—фрагмент PRELE 145

Анализ

—дисперсионный 40

—последовательный 101

—статистический многомерный 85

Анализ регрессионный

—выполнение предпосылок 156
157

—множественный

(многофакторный)

—алгоритм RASTA 141

—выбор предпосылок и началь-
ных условий 156

—матрица дисперсий-ковариаций
102, 141

—мультиколлинеарность факто-
ров 137, 139

—проверка предварительных
предпосылок 169

—определение 85

—регуляризация

— γ -параметр 95

—гребневая регрессия 95

—идея 95

—плохо обусловленных решений
96

—система предпосылок 157

—предпосылки 1–11 157–163

Аппроксимация 36, 75, 84, 107

—метод наименьших квадратов 76,
87, 88, 95, 157, 159

—определение 76

—оптимальная 77

—рациональная 77

—требования 77

—цель 77

Базис

—в линейном пространстве 106

—неортогональный 89

—ортогональный 89, 90, 106, 140

Вектор

—близкий к параллельному 91, 92

—коллинеарность (определение)
136

—ортогональный 91, 92

—разложение в выбранном базисе
91

—условие ортогональности 141

Гносеология инженерная 45

Гомеоморфизм 143

Задача

—корректно поставленная
(корректная)

—условия 89

—некорректно поставленная
(некорректная) 36, 89, 90, 92,
96

—оптимальное конструирование
93

—погрешности 89

—регуляризация 93

—устойчивость решения 89

Закон исключенного третьего 64,
73

Инновация технологическая 50

- Информатизация 18
- Информатика экспериментальная 45
- Информация 18, 20, 37, 47, 215
- количество 140
 - неопределенность 65
 - неформализуемая 35, 37
 - о качестве товаров 52
 - обеспечение технологических решений 19
 - определение количества 139
 - прибыль от использования 46
 - свойства основных подходов (методов) 32
 - семантическая 107
 - техническая 35
 - технологическая 35, 37, 50, 67
 - управляющая 64
 - эффективность 19
 - эффективность извлечения 39, 165, 170
- Качество
- обеспечение 52
 - производства изделий 51
- Коэффициент корреляции множественный
- оценка качества решения 172
 - проверка статистической значимости 113, 170, 171
- Критерии (параметры) качества
- вероятностные 56, 58, 59, 72
 - детерминированные 56, 58, 59, 72
 - индетерминированные (адаптивные) 56, 58, 60, 72
- Критерии качества многофакторной математической модели 169
- адекватность 165, 170
 - множественный коэффициент корреляции 171
 - анализ предпосылок о свойствах случайных ошибок 165, 169
 - анализ свойств остатков 165
 - информативное подмножество главных эффектов и взаимодействий факторов 164, 165
 - информативность 165, 171
 - общая оценка модели 165
 - оценка семантической (информационной) 165, 170
 - статистическая значимость 165, 169
 - теоретическая эффективность извлечения полезной информации 164, 170
 - устойчивость коэффициентов 165, 171
 - фактическая эффективность извлечения информации 165, 172
- Критерий
- А-оптимальности 103
 - D-оптимальности 94, 103
 - E-оптимальности 103
 - G-оптимальности 103
 - Q-оптимальности 94
- Кружки контроля качества 52, 53
- Курс лекций
- "математическая теория планирования эксперимента" 221
 - "математическое моделирование и оптимизация технологических систем" 221
 - "оптимизация технологических процессов в машиностроении" 221
 - "оптимизация технологических решений" 221
 - "основы научных исследований и технического творчества" 221
 - "теория планирования эксперимента" 221
 - "технология качества" 54
 - "экспериментально-статистические методы в НИОКР" 221

- ЛП₇ равномерно распределенные последовательности 123
- информационные возможности 129
- использование 126, 162, 190, 210
- недостатки 126
- определение 122
- планирование эксперимента 121, 135
- свойства 122

Математика

- классическая 161
- вычисления теоретические 136
- концепция "точности" 136
- теоретическая 90
- выбор предпосылок 156
- "чистая" 101

Математическая абстракция потенциальной осуществимости 88

Матрица дисперсий-ковариаций 102, 140, 141

Метод

- аппроксимации 36
- группового учета аргументов 44
- математико-статистический 27
- применение 82
- Монте-Карль 80
- проективной геометрии 149
- робастный (устойчивый) в прикладной статистике 70
- Тагути 35
- теоретической математики 99
- формальный 30
- эвристический 30
- экспериментальный 37

Методология

- вычислительная 37
- вычислительный эксперимент 39
- информационной коррекции поверхности отклика 197, 223

- кибернетическая 37, 38
- научная 21, 22, 46
- оптимального конструирования эксперимента 100
- получения научной информации 25
- теория планирования эксперимента 39
- экспериментальная 37

Моделирование кибернетическое 38, 84, 85

Моделирование математическое 21

—конструкции и технологии изготовления твердосплавных сверл 183

—область образа 141, 143, 147

—прикладное 98

—семантичность (информационная) 28 79, 85

—определение 170

—структур параметров технологического процесса 223

—термонапряженной изоляции 200

—технологических условий сварки полиэтиленовых труб 188

—технологической системы 98, 179

—основные критерии 74

—основные результаты 211

—упругие деформации 180

—устойчивость 88

—шестикомпонентных измерительных систем 192

Модель математическая

—алгоритм выбора структурных составляющих 111

—аналитическая

—исходные предпосылки 89

—тождественность системе 88

—точность 71

—в теории обработки резанием 75

—взаимодействия факторов 103

- закоррелированность эффектов 167, 168
- исходные данные
- использование таксономических методов 163
- распределение точек исходной совокупности несвязное 163
- содержательный анализ 169
- многокритериальная характеристика свойств 169
- многофакторная
- информационная коррекция систематических ошибок 198
- линейная 211
- последовательная схема формирования 134
- применение 223, 224
- проверка критериев качества 81, 164, 165, 167, 169, 170
- системные условия 130
- требования к ней 28
- назначение 78
- нелинейная 86
- опыт формирования 79
- основные типы решаемых задач 14
- полиномиальная линейная относительно параметров 85, 86
- причины неадекватности 113
- результаты статистического анализа 187, 191, 195, 208
- с семантической структурой 96
- семантическая (смысловая) интерпретация 106
- синтез
- предпосылки 70
- принцип структурной минимизации 97, 109
- статистическая независимость коэффициентов 106
- степенного вида 42
- стохастическая 48, 68
- термонапряженной изоляции 200, 210
- технологического процесса 42, 60
- этапы построения 74
- технологической системы 79
- требования к коэффициентам 105
- устойчивость коэффициентов 99, 146, 167, 171
- учет систематических ошибок 200
- формирование 79
- целесообразность использования 165
- эллипсоид рассеяния оценок параметров 94
- эффективность практического применения 212
- Модель системы
- сложной технологической 57, 69
- шестикомпонентной измерительной 194
- Мультиколлинеарность
- коллинеарность векторов 136
- определение 136
- Мультиколлинеарность факторов 137, 139, 154
- в ортогональной системе координат 149
- последствия 140
- устойчивость коэффициентов 136, 146, 148
- Мультиколлинеарность эффектов
- меры измерения 167, 168
- максимальная сопряженность эффектов 168
- парная 167
- мера обусловленности матрицы по *Нейману-Голдстейну* 167
- минимальное характеристическое число информационной матрицы *Фишера* 167

- определитель матрицы (информационной Фишера) 167
- число обусловленности матрицы $X^T X$ 168
- Наследственность технологическая 81
- Научаемость 23
- Оптимизация многокритериальная 21, 22
- Ошибка систематическая 95, 197, 198, 200, 215
- Парадигма 31, 61, 68
 - научная 60
 - отечественная 83
- Планирование эксперимента 90
 - метод 27, 28
 - область прообраза 141, 143, 147
 - алгоритм отображения в область образа математического моделирования 143
 - обработка результатов эксперимента
 - активного 151
 - пассивного 151, 152
 - с использованием
 - метода проективной геометрии 150
 - полярной системы координат 150
 - с фиктивными факторами (фрагмент PRELE) 145
- Подход
 - вероятностный 63
 - детерминированный 63
 - идиографический 31, 33, 34, 35, 46, 47
 - индетерминированный (адаптивный), 33
 - кибернетический 27, 28
 - номографический 31, 33, 34, 35, 46
 - онтологический 82
 - статистический 98
 - феноменологический 84
 - определение 82
- Подход (метод)
 - вычислительный эксперимент 25, 26, 29, 31, 32, 35, 46, 210
 - информационные свойства основных методов получения информации 32
 - математический 35
 - поиск существующих решений 46
 - теоретико-аналитический 25, 26, 27, 29, 32, 40, 46, 88
 - низкая эффективность использования 79, 83
 - точность модели 82
 - эвристический 25, 30, 31, 32, 35, 46
 - алгоритм (теория) решения изобретательских задач
 - Г.С. Альтшуллера* 30
 - метод гирлянд случайностей и ассоциаций *Г. Буша* 30
 - метод контрольных вопросов *Т. Эйлоарта* 30
 - метод мозгового штурма *А. Осборна* 30
 - метод фокальных объектов *Ч. Вайтинга* 30
 - морфологический анализ *Ф. Цвикки* 30
 - обобщенный алгоритм *А.И. Половинкина* 30
 - синектика *В. Гордона* 30
 - экспериментально-статистический 25, 27, 28, 31, 32, 35, 36, 45, 46, 169
 - многокритериальной поисковой оптимизации 45, 52

—многофакторного математического моделирования 45, 52

Практика системная 26, 178

Принцип

—информационной коррекции систематических ошибок 197, 215, 223

—*Ле Шателье-Самуэльсона* 58

Программное обеспечение

—интеллектуальное 173

—обработка результатов экспериментов 173, 174

Программное средство

—"Планирование, регрессия и анализ моделей" 93, 113, 161, 174, 175, 176, 178, 220, 224

—использование 180, 185, 189, 191, 203, 219

—преимущества 176

—устойчивость коэффициентов 168, 172

Продукция наукоемкая 21, 23, 24

Процесс технологический 49

—моделирование структур параметров 223

—оптимальное управление 24

—себестоимость 49

—случайный 62

—структура 78

Распределение точек исходной совокупности несвязное 163

Расходы на НИОКР 20

Регуляризация плохо обусловленных решений 93, 95, 36

Результаты внедрения разработанных методов 219

Ресурсы сложных систем 213, 218

—информационные 21, 212, 216, 224

—системные 223, 224

—оптимизационные 217

—системные 217

—функциональные 216

—целевые 217

—физические 212, 215, 223

Система

—возмущения внешние и внутренние 88

—индетерминированная (адаптивная) 63

—информационные ресурсы 21

—линейных уравнений

—относительная погрешность сглатки 92

—плохо обусловленная 90

—научных исследований автоматизированная 93

—определение 77

—ортогональных полиномов *Чебышева* 166, 225

—плохо обусловленная 36

—прикладная 26

—сложная 73

—хаотическое движение 61

—сложность 101

—структура 77

—техническая 46

—"точно вовремя" 53

—управляющая 69

—установление связей 81

—формализация реальной действительности 98

—формальная 26

—"черный ящик" 28, 38, 68, 84, 85

Система базисных функций 136

—мультиколлинеарная 136

Система координат

—криволинейных (использование) 148

—ортогональная 89

—закоррелированность факторов 149

—полярная (использование) 149

—прямоугольная (использование)
148

Система технологическая 46, 47,
48, 49, 64, 72

—анализ свойств 67

—анализ факторов 54

—аппроксимация 77

—воздействие случайное 62

—выбор предпосылок 156

—информационная модель 57

—критерии (параметры) качества
55, 56, 57, 69

—неопределенность состояния 73

—описание вероятностное
(стохастическое) 63

—системные свойства 57, 66, 73

—сложность 73

—содержательные свойства 64

—статус 66

—структура 35

—онтологическое представление
85

—тенденции развития 66

—формализованное описание 73,
74, 76, 99

—структурная схема 16

Стойкость режущего инструмента
62

Структура

—математическая 156

—"простая" 97

—"сложная" 97

Структура математической модели
42, 44, 45, 64, 70, 96, 97, 105,
107, 108, 109

—аддитивные составляющие 78

—адекватность 107

—выбор 96

—в условиях мультиколлинеар-
ности 96

—формализованный 99

—эффектов 97

—мультипликативные составляю-
щие 78

—наиболее близкая к истинной 93

—поиск 96

—постулирование 107, 108, 134

—принцип последовательного
расширения 108

—синтез 70

—следствия упрощений 90

—устойчивость (корректность) 99,
167

—определение 167

—формирование связей 81

Теорема

—Вейерштрасса 80, 87

—Хотеллинга 105

Теория 26

—случайных функций 62

Технология 48, 50

—высокая 51

—информационная 19, 20, 38, 46,
47, 52

Технология машиностроения 47,
48

—издания специальные 78

Точность реальных вычислений 71

Уравнение регрессии 142

—"наилучшее"

—необходимые и достаточные
условия получения 105

—схема получения 101

—условия формирования 134

—линейное относительно незави-
симых параметров 164

—формализованное определение
структуры 223

—многофакторное

—алгоритм RASTA 141

—информационные свойства 153

—устойчивость коэффициентов
136, 154

- алгоритмы 223
- схема определения количества информации 142

Фактор

- взаимодействия 43, 103, 104
 - качественный 55
 - количественный 55
 - неконтролируемый 55, 69
 - неуправляемый 54, 69
 - область определения 55
 - простой 55
 - реальный (физический) 55
 - сложность поведения 101
 - сложный 55
 - структурная связь с критериями качества 79, 81
 - технологической системы 54
 - управляемый 54, 69
 - фиктивный 55
 - использование 145
- ### Факторное пространство 137
- закоррелированность факторов 141
 - метод проективной геометрии 149
 - область совместного существования факторов 152
 - оптимальные координаты 146
 - планирование на
 - кубе 138
 - симплексе 138
 - сфере 138
 - полярная система координат 149
 - последовательность расположения опытов 117
 - произвольная область 143
 - расположение точек ЛП_r равномерно распределенных последовательностей 124
 - система криволинейных координат 150

- топологическое подобие (гомеоморфизм) 143
- формализованное представление областей 142

Чебышева ортогональные многочлены

- использование 163, 166, 225
 - формулы 226
- ### Четырехвершинник 149
- ### Число обусловленности μ 92, 93

Эксперимент

- активный 39
 - методология многофакторного 42
 - метрологический многофакторный 198
 - последовательная схема проведения 101, 108
 - примеры 109
 - проблема автоматизации
 - интерпретации данных 92
 - моделирования 92
 - обработки данных 92
 - проблематика постановки вопроса 36
 - теория оптимального 40
 - теория планирования 39, 40
 - технологический 98
 - конструирование 92
 - оптимальное конструирование 96, 99
- ### Эксперимента план
- для большого числа факторов 117
 - квази-D-оптимальный
 - второго порядка на кубе типа B_6 193
 - информационные возможности 120
 - пример 128
 - синтез 119, 135

- эффективность извлечения полезной информации 164
- квазиоптимальный 116
- квазиортогональный (эвристическое построение) 116
- критерии
- квази- D -оптимальность 174
- некомпозиционность 174
- ортогональность 174
- рототабельность 174
- ЛП_T равномерно распределенные последовательности
- анализ 132
- информационные возможности (примеры) 129
- необходимое число опытов 111
- последовательный
- анализ 130, 131
- информационные возможности 127
- примеры 128
- реплики регулярные дробные 115
- условие пропорциональности частот уровней факторов 114
- факторный
- A -оптимальный 94
- D -оптимальный 94
- Q -оптимальный 94
- дробный 102, 114, 185, 211
- методология 223
- модель для факторов
- качественных 114
- количественных 114
- определение 114
- подход (метод) эвристический 118
- полный 102, 104
- возможности (свойства) 134
- свойства модели 103
- структура 76, 80
- регулярный 94, 115, 166
- использование 114, 135
- мощности t 94, 114
- Эмергентность 77, 78, 103
- определение 67
- Энтропия 18, 47, 215, 216

Наукове видання

Станіслав Григорович Радченко

**Математичне моделювання
технологічних процесів у
машинобудуванні**

Монографія

(На російській мові)

Підписано до друку 4.04.98. Формат 60x80 ¹/₁₆. Папір друкарський. Друк
офсетний. Умовно друкованих аркушів 13,03. Замовлення 17с.

Тираж 500 прим.

Ціна договірна.

ЗАТ "Укрспецмонтажпроект"



Радченко Станислав Григорьевич кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт", лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники. По учебному процессу им были успешно поставлены курсы "Теория планирования эксперимента" (для аспирантов, соискателей, научных сотрудников), "Основы научных исследований и технического творчества", "Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов" (для студентов), "Оптимизация технологических процессов в машиностроении" (для слушателей факультета повышения квалификации преподавателей вузов), "Оптимизация технических решений" (для инженеров на факультете повышения квалификации).

Его научные интересы связаны с разработкой теории и практики многофакторного математического моделирования сложных систем - технологических, технических, измерительных, материаловедческих. Автор более 150 печатных работ, в числе которых 2 монографии и учебное пособие. Ведет постоянную научную работу в областях: высокая технология проведения наукоемких исследований, теория планирования эксперимента, многофакторный регрессионный анализ, технология машиностроения.