



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология машиностроения»

**Методические указания
по выполнению
практических работ
по дисциплине**

**«Основы планирования
эксперимента»**

Авторы
Чукарина И.М.,
Чава М.М.

Ростов-на-Дону, 2017

Аннотация

«Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Основы планирования эксперимента» предназначен для студентов всех форм обучения направлений 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

Авторы



Доцент, к.т.н.,
доцент кафедры
«Технология
машиностроения»
Чукарина И.М.



Доцент, к.т.н.,
доцент кафедры
«Технология
машиностроения»
Чаава М.М.



Оглавление

Основы математического планирования эксперимента4	
Общая последовательность планирования4	4
эксперимента.....4	4
Объект исследования. Виды экспериментов5	5
Параметр оптимизации.....7	7
Факторы эксперимента8	8
Математические модели исследования.....11	11
Расчет коэффициентов регрессии.....14	14
Практическая работа 116	
Разработка программы исследований.16	
Выбор параметров оптимизации и варьируемых факторов16	
Практическая работа 216	
Планирование многофакторного эксперимента. Определение влияния различных факторов на уровень вибрации шпиндельной бабки токарного станка.....16	
Практическая работа 317	
Оценка вибраций шпиндельной бабки фрезерного станка на основе полного факторного эксперимента.....17	
Практическая работа 417	
обработка результатов эксперимента18	
Список литературы18	

ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Планирование эксперимента - это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Задачи, для решения которых может использоваться планирование эксперимента, чрезвычайно разнообразны. К ним относятся: поиск оптимальных условий, построение интерполяционных формул, выбор существенных факторов, оценка и уточнение констант теоретических моделей, выбор наиболее приемлемых из некоторого множества гипотез о механизме явлений, исследование диаграмм состав - свойство и т.д. Одной из главных задач эксперимента является получение и проверка математической модели объекта, описывающей в количественной форме взаимосвязи между входными и выходными параметрами объекта.

Общая последовательность планирования эксперимента

Общая последовательность при планировании эксперимента с целью получения математической модели такова:

- 1) Определение объекта исследований, параметров оптимизации, факторов, интервалов и уровней варьирования.
- 2) Выбор зависимости (линейная, квадратичная и т.д.) и полинома для построения модели.
- 3) Составление матрицы планирования для проведения эксперимента.
- 4) Проведение эксперимента.

- 5) Математическая обработка полученных данных: поиск коэффициентов регрессии и составление математической модели.
- 6) Проверка адекватности модели.

Объект исследования. Виды экспериментов

В теории планирования эксперимента объект исследований принято представлять в виде «черного ящика» (рисунок 1). Стрелки справа изображают численные характеристики целей исследования. Мы их обозначаем буквой y и называем *параметрами оптимизации*. В литературе встречаются другие названия: критерий оптимизации, целевая функция, выход «черного ящика» и т.д.

Для проведения эксперимента необходимо иметь возможность воздействовать на наведение «черного ящика». Все способы такого воздействия мы обозначаем буквой x и называем *факторами*. Их называют также входами «черного ящика».

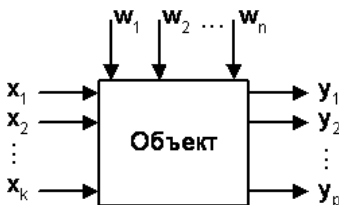


Рисунок 1. Информационная модель процесса

Различные виды экспериментов схематично представлены на рисунке 2.

Однофакторный пассивный эксперимент проводится путем выполнения n пар измерений в дискретные моменты времени единственного входного параметра x и соответствующих значений выходного параметра y (рисунок 2,а). Аналитическая за-

зависимость между этими параметрами вследствие случайного характера возмущающих воздействий рассматривается в виде зависимости математического ожидания y от значения x , носящей название регрессионной. Целью однофакторного пассивного эксперимента является построение *регрессионной модели* - установление зависимости $y = f(x)$.

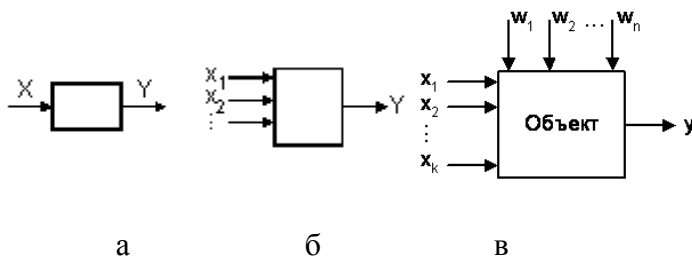


Рисунок 2. Виды экспериментов

Многофакторный пассивный эксперимент проводится при контроле значений нескольких входных параметров x_i (рисунок 2,б) и его целью является установление зависимости выходного параметра от двух или более переменных $y = F(x_1, x_2, \dots)$.

Полный факторный эксперимент предполагает возможность управлять объектом по одному или нескольким независимым каналам (рисунок 2,в).

В общем случае, схема эксперимента может быть представлена в виде, представленном на рисунке 1. В схеме используются следующие группы параметров:

1. *управляющие* (входные x_i)
2. *параметры состояния* (выходные Y)

3. *возмущающие воздействия* (W_i)

При многофакторном и полном факторном эксперименте выходных параметров может быть несколько.

Параметр оптимизации

Под **параметром оптимизации** (критерий оптимизации) понимают характеристику цели, заданную количественно. Параметр оптимизации является реакцией (откликом) на воздействие факторов, которые определяют поведение выбранной системы.

Он должен быть *количественным*, задаваться числом. Множество значений, которые может принимать параметр оптимизации, называется областью его определения. Количественная оценка параметра оптимизации на практике не всегда возможна. В таких случаях пользуются приемом, называемым ранжированием. При этом параметрам оптимизации присваиваются оценки - ранги по заранее выбранной шкале: двухбалльной, пятибалльной и т.д.

Параметр оптимизации должен соответствовать следующим требованиям:

1) должен быть *количественным*.

2) выражаться *одним числом*.

3) должен обладать *однозначностью* в статистическом смысле. Заданному набору значений факторов должно соответствовать одно значение параметра оптимизации, при этом обратное неверно: одному и тому же значению параметра могут соответствовать разные наборы значений факторов.

4) должен давать *воз-* возможность действительно эф-

фективной оценки функционирования системы. Представление об объекте не остается постоянным в ходе исследования. Оно меняется по мере накопления информации и в зависимости от достигнутых результатов. Это приводит к последовательному подходу при выборе параметра оптимизации. Так, например, на первых стадиях исследования технологических процессов в качестве параметра оптимизации часто используется выход продукта. Однако в дальнейшем, когда возможность повышения выхода исчерпана, начинают интересоваться такими параметрами, как себестоимость, чистота продукта и т.д.

5) *требование универсальности или полноты.* Под универсальностью параметра оптимизации понимают его способность всесторонне охарактеризовать объект. В частности, технологические параметры не достаточно универсальны: они не учитывают экономику. Универсальностью обладают, например, обобщенные параметры оптимизации, которые строятся как функции от нескольких частных параметров.

б) *желательно, чтобы параметр оптимизации имел физический смысл, был простым и легко вычисляемым.*

Факторы эксперимента

После выбора объекта исследования и параметра оптимизации нужно рассмотреть все **факторы**, которые могут влиять на процесс. Если какой-либо существенный фактор окажется неучтенным и принимал произвольные значения, не контролируемые экспериментатором, то это значительно увеличит ошибку опыта. При поддержании этого фактора на определенном уровне может быть получено ложное представление об оптимуме, т.к. нет гарантии, что полученный уровень является оптимальным.

С другой стороны большое число факторов увеличивает число опытов и размерность

Фактором называется измеряемая переменная величина, принимающая в некоторый момент времени определенное значение и влияющая на объект исследования. В практических задачах области определения факторов имеют ограничения, которые носят либо принципиальный, либо технический характер.

Факторы разделяются на количественные и качественные.

К количественным относятся те факторы, которые можно измерять, взвешивать и т.д.

Качественные факторы - это различные вещества, технологические способы, приборы, исполнители и т.п.

Хотя качественным факторам не соответствует числовая шкала, но при планировании эксперимента к ним применяют условную порядковую шкалу в соответствии с уровнями, т.е. производится кодирование.

Факторы должны быть управляемыми, это значит, что выбранное нужное значение фактора можно поддерживать постоянным в течение всего опыта. Планировать эксперимент можно только в том случае, если уровни факторов подчиняются воле экспериментатора. Например, экспериментальная установка смонтирована на открытой площадке. Здесь температурой воздуха мы не можем управлять, ее можно только контролировать, и потому при выполнении опытов температуру, как фактор, мы не можем учитывать.

Точность замеров факторов должна быть возможно более высокой. Степень точности определяется диапазоном изменения факторов. В длительных процессах, измеряемых многими часами, минуты можно не учитывать, а в быстрых процессах приходится учитывать доли секунды.

Факторы должны быть однозначны. Трудно управлять

фактором, который является функцией других факторов. Но в планировании могут участвовать другие факторы, такие, как соотношения между компонентами, их логарифмы и т.п.

Требования к совокупности факторов

При планировании эксперимента одновременно изменяют несколько факторов, поэтому необходимо знать требования к совокупности факторов. Прежде всего выдвигается требование совместимости. Совместимость факторов означает, что все их комбинации осуществимы и безопасны. Несовместимость факторов наблюдается на границах областей их определения. Избавиться от нее можно сокращением областей. Положение усложняется, если несовместимость проявляется внутри областей определения. Одно из возможных решений - разбиение на подобласти и решение двух отдельных задач.

При планировании эксперимента важна независимость факторов, т.е. возможность установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов. Если это условие невыполнимо, то невозможно планировать эксперимент.

Уровни факторов

Фактор считается заданным, если указаны его название и область определения. В выбранной области определения он может иметь несколько значений, которые соответствуют числу его различных состояний. Выбранные для эксперимента количественные или качественные состояния фактора носят название **уровней фактора**. Минимальное число уровней, обычно применяемое на первой стадии работы, равно 2. Это верхний и нижний уровни, обозначаемые в кодированных координатах через +1 и -1. Но такое число уровней недостаточно для построения моделей второго порядка (ведь фактор принимает только два значения, а через две точки можно провести множество линий различной

кривизны).

Выбор уровней варьирования может осуществляться следующим образом. Предположим, в некоторой задаче фактор (температура) мог изменяться от 140 до 180°C. Естественно, за нулевой уровень было принято среднее значение фактора, соответствующее 160°C. Тогда при трех уровнях варьирования значение фактора на верхнем уровне (+1) будет равно 180°C, а на нижнем 140°C. Интервал варьирования будет равен 20°C.

Математические модели исследования

При решении задачи будем использовать **математические модели исследования**. Под математической моделью мы понимаем уравнение, связывающее параметр оптимизации с факторами. Это уравнение в общем виде можно записать так:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

где символ $f(\dots)$, как обычно в математике, заменяет слова: «функция от». Такая функция называется *функцией отклика*. Наглядное, удобное воспринимаемое представление о функции отклика дает ее геометрический аналог - поверхность отклика (рис. 3).

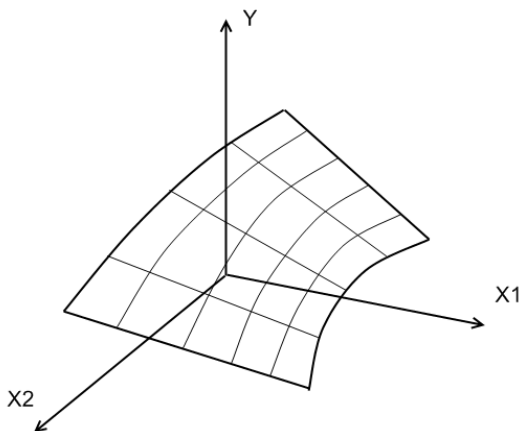


Рис. 3. Поверхность отклика

Наиболее часто в качестве моделей применяются приведенные ниже полиномы.

Полином первой степени:

$$y = \theta_0 + \sum_1^k \theta_i x_i + \sum_1^k \theta_{ij} x_i x_j$$

Полином второй степени:

$$y = \theta_0 + \sum_1^k \theta_i x_i + \sum_1^k \theta_{ij} x_i x_j + \sum_1^k \theta_{ii} x_i^2 .$$

Полиномы третьей степени:

$$y = \theta_0 + \sum_1^k \theta_i x_i + \sum_1^k \theta_{ij} x_i x_j + \sum_1^k \theta_{ijj} x_i^2 x_j + \\ + \sum_1^k \theta_{ijj} x_i x_j^2 + \sum_1^k \theta_{iii} x_i^3 .$$

Здесь в этих уравнениях:

y - значения критерия; θ_i - линейные коэффициенты регрес-

сии;

v_{ij} - коэффициенты двойного взаимодействия; x_i - кодированные значения факторов.

Модель должна быть *адекватной*, т.е. с достаточной точностью описывать изменение реального процесса. *Проверка адекватности модели* выполняется при помощи специальных статистических методов.

После определения факторов, их уровней и интервалов варьирования, параметров оптимизации и построения информационной модели необходимо заполнить матрицу планирования, по которой в дальнейшем будет проводиться эксперимент.

Число возможных опытов определяют по выражению

$$N = p^k,$$

где N - число опытов; p - число уровней; k - число факторов.

Примеры матриц планирования для 2-х и 3-х факторов на 2-х уровнях варьирования представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Матрица проведения эксперимента 2^2

Но- мер опыта	Кодовое обо- значение		Натуральные значения		Y
	x_1	x_2			
1	+1	+1			y_1
2	-1	+1			y_2

3	+1	-1			3	y
4	-1	-1			4	y

Таблица 2

Матрица проведения эксперимента 2^3

Но- мер опыта	Кодовое обозначение			Натуральные значения			У
	x_1	x_2	x_3				
1	1	1	1				y_1
2	1	1	1				y_2
3	1	1	-1				y_3
4	1	1	-1				y_4
5	1	1	-1				y_5
6	1	1	-1				y_6
7	1	1	1				y_7
8	1	1	1				y_8

Расчет коэффициентов регрессии

Построив матрицу планирования осуществляют экспери-

мент. Получив экспериментальные данные рассчитывают значения коэффициентов регрессии.

Их можно рассчитать следующим образом. Значение свободного члена (θ_0) берут как среднее арифметическое всех значений параметра оптимизации в матрице:

$$\theta_0 = \frac{\sum_1^N y_u}{N},$$

где y_u - значения параметра оптимизации в u -м опыте; N - число опытов в матрице.

Линейные коэффициенты регрессии рассчитывают по формуле

$$\theta_i = \frac{\sum_1^N x_{iu} y_u}{\sum_1^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_1^N x_{iu} y_u}{N},$$

где x_{iu} - кодированное значение фактора x_i в u -м опы-

$$\theta_{ij} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} y_u}{\sum_1^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} y_u}{N}.$$

те.

Коэффициенты регрессии, характеризующие парное взаимодействие факторов, находят по формуле:

Полное число всех возможных коэффициентов регрессии, включая θ_0 , линейные коэффициенты и коэффициенты взаимодействий всех порядков, равно числу опытов полного факторного эксперимента.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 1

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПТИМИЗАЦИИ И ВАРЬИРУЕМЫХ ФАКТОРОВ

Задание

Имеется установка для определения влияния вязкости масла на износ шестерен коробки перемены передач (предложите вариант конструкции). Требуется определить влияние вязкости масла на износ шестерен при различных режимах работы КПП. Для этого необходимо спланировать многофакторный эксперимент.

Порядок выполнения работы

- 1) Определите объект исследований.
- 2) Определите управляемые факторы и по возможности их пределы и уровни варьирования. Укажите, чем ограничены пределы варьирования.
- 3) Определите, что будет являться критерием оптимизации (параметром состояния).
- 4) Определите возможные возмущающие воздействия.
- 5) Постройте информационную модель в виде «черного ящика».

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 2

ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА УРОВЕНЬ ВИБРАЦИИ ШПИНДЕЛЬНОЙ БАБКИ ТОКАРНОГО СТАНКА.

Порядок выполнения работы

- 1) Определите объект исследований.
- 2) Определите управляемые факторы и по возможности их пределы и уровни варьирования. Укажите, чем ограничены пределы варьирования.
- 3) Определите и запишите что будет являться критерием оптимизации (параметром состояния).
- 4) Определите и запишите возможные возмущающие воздействия.
- 6) Пользуясь теоретическими материалами, изложенными выше, выберите предполагаемую зависимость (линейная, квадратичная и т.д.) и полином для построения модели.
- 7) Составьте матрицу планирования эксперимента.
- 8) Кратко опишите, как провести эксперимент и обработать экспериментальные данные.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 3

ОЦЕНКА ВИБРАЦИЙ ШПИНДЕЛЬНОЙ БАБКИ ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА НА ОСНОВЕ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Порядок выполнения работы

- 1) Определите объект исследований.
- 2) Определите управляемые факторы, их пределы и уровни варьирования.
- 3) Определите и запишите что будет являться критерием оптимизации (параметром состояния).
- 4) Определите и запишите возможные возмущающие воздействия.
- 6) Пользуясь теоретическими материалами, изложенными выше, выберите модель эксперимента.
- 7) Составьте матрицу планирования эксперимента.
- 8) Поясните, как провести эксперимент.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 4

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Порядок выполнения работы

- 1) Кратко опишите, как обработать экспериментальные данные, полученные в результате исследования вибраций шпиндельной бабаки фрезерного станка.
- 2) Выберите предполагаемую зависимость (линейная, квадратичная и т.д.) и полином для построения модели.
- 3) Определите коэффициенты полинома. Составьте матрицу планирования эксперимента.
- 4) Определите статистическую значимость коэффициентов и выполните окончательный выбор модели .
- 5) Выполните подстановку каждого фактора в натуральных единицах по формуле перехода.
- 6) Выполните оценку адекватности модели по критериям Фишера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы научных исследований. Организация и планирование эксперимента: учебное пособие/ Сафин Р.Г., Иванов А.И., Тимербаев Н.Ф., Казанский национальный исследовательский технологический университет, Лань, 2013;
2. Основы математической теории планирования эксперимента : учебно-метод. пособие / А. Н. Чукарин [и др.]; ДГТУ. - Ростов н/Д. : ИЦ ДГТУ, 2014;
3. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие/ Боярский М.В., Анисимов Э.А.; Поволжский государственный технологический университет, 2015;
4. Технологии экспериментальных исследований/ И.Р.Асланян, А.П.Бабичев, В.Ю.Блюменштейн; Иркутск, НИ ИргТУ, 2011г.;
5. Технология контроля и испытаний машин/ М.А.Тамаркин, Г.А. Прокопец, А.А. Прокопец; Ростов н/Д, Изд. центр ДГТУ, 2009г.;
6. Организация и планирование экспериментов / Е. Г. Порсев; Порсев Е. Г. , 2010;
7. Оптимальное планирование эксперимента в задачах структур-

Основы планирования эксперимента

- ной и параметрической идентификации моделей многофакторных систем / А. А. Попов; Попов А. А. – 2013;
8. Методика и практика технического эксперимента/ В.А.Рогов, Г.Г.Позняк; Москва АКАДЕМИА МО РФ, 2005 г.