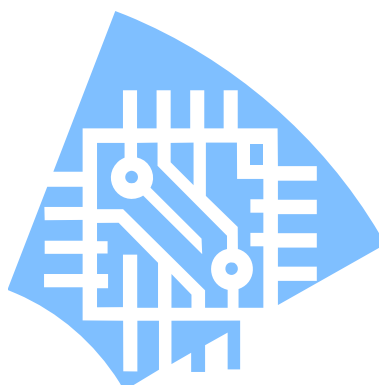


Т.Ю. Дорохова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**



Тамбов 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»



Т.Ю. Дорохова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

*Методические указания к курсовому проектированию для магистрантов
направления 211000 «Конструирование и технология электронных средств»*

Тамбов 2013

УДК 621.396.6
ББК 32.811

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры «Радиотехника» Н.А. Кольтюков

Т.Ю. Дорохова

Моделирование конструкций и технологических процессов производства электронных средств: Методические указания к курсовому проектированию/
Сост.: Т.Ю. Дорохова, Тамбов 2012, 19 с.

Методические указания включают практические рекомендации к курсовому проекту по дисциплине «Моделирование конструкций и технологических процессов производства электронных средств» и предназначены для магистрантов направления 211000 «Конструирование и технология электронных средств».

УДК 621.396.6
ББК 32.811

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2013

© Т.Ю. Дорохова, 2013

Введение

Радиоэлектронные средства (РЭС) широко применяются почти во всех отраслях народного хозяйства и стали активным катализатором их интенсивного развития. Для успешного выполнения предписанных им функций РЭС должны обладать точностью, долговечностью, надежностью и экономичностью. Эти параметры в первую очередь обеспечиваются достигнутыми уровнями технологии, организации и культуры производства, соответствующей элементной базой, а также развитием ряда фундаментальных и прикладных наук.

При производстве РЭС разработчики сталкиваются с проблемами сложных схемных и конструкторских решений, увеличением численности электрорадиоэлементов (ЭРЭ), интегральных микросхем (ИМС) и многими другими, при этом необходим производственный процесс, в ходе которого осуществляется превращение полуфабрикатов в готовое изделие. Данное методическое пособие предназначено для магистрантов направления 211000 «Конструирование и технология электронных средств» и содержит рекомендации по выполнению курсового проекта по дисциплине «Моделирование конструкций и технологических процессов производства электронных средств».

1. Цели и задачи курсового проектирования

Задачей курсового проекта является обучение магистрантов существующим современным методам моделирования технологических процессов производства электронных средств, позволяющим проводить целенаправленный синтез и системный анализ технологических процессов электронных средств и систем; обучение практическим навыкам проектирования и моделирования технологических процессов электронных средств; построения математической модели и оценке ее адекватности.

1.1. Требования к выполнению курсового проекта

Курсовой проект является самостоятельной работой магистранта по дисциплине «Моделирование конструкций и технологических процессов производства ЭС», знания полученный в процессе курсового проектирования необходимы для успешного выполнения в дальнейшем научных исследований и написания магистерской диссертации.

Пояснительная записка и состав графической части проекта должны удовлетворять требованиям к содержанию и оформлению курсового проекта.

Пояснительная записка (ПЗ) курсового проекта должна иметь объем 40-60 страниц машинописного текста, включая необходимые иллюстрирующие материалы (чертежи, схемы, диаграммы, графики, рисунки), магистрант должен в краткой и ясной форме грамотно изложить идеи и существо работы, привести результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований, сделать конкретные выводы. Требования к оформлению: по СТП ТГТУ 07-97.

Расчетно-пояснительная записка курсового проекта должна содержать следующие структурные части:

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1. Моделирование технологических процессов изготовления ЭС.
 - 1.1 Описание блока, его назначение и характеристики.
 - 1.2 Технологическая подготовка производства.
 - 1.3 Разработка технологического процесса изготовления платы печатной.
 - 1.4 Оценка технологичности конструкции блока.
 - 1.5 Моделирование варианта сборки блока.
 - 1.6 Разработка технологического процесса сборки блока
2. Экспериментальное определение модели технологического процесса
 - 2.1 Описание технологического процесса
 - 2.2 Обоснованное выявление факторов

2.3 Формализованное представление технологического процесса

2.4 Разработка алгоритма расчета и его описание (если есть).

2.5 Проведение вычислительного эксперимента и анализ полученных результатов (составление плана эксперимента и заполнение исходными данными)

2.6 Построение математической модели и оценка ее адекватности

Список литературы

Приложения

Приложение А (обязательное) Спецификация

Приложение Б (обязательное) Технологический процесс изготовления платы печатной

Приложение В (обязательное) Технологический процесс сборки блока

Приложение Г Листинг программы расчета

2. Рекомендации по основным разделам курсового проекта

2.1. Экспериментальное определение модели технологического процесса

В данном разделе курсового проекта необходимо привести подробное описание технологического процесса в соответствии с вариантом задания на курсовое проектирование.

В разделе «Обоснованное выявление факторов» при выявлении факторов следует учитывать следующее:

1. Факторы – это параметры, которые оказывают непосредственное влияние на объект. При реализации методов математического планирования очень важно учесть все существующие (значимые) факторы. Если по ошибке один из существующих факторов выпадает из рассмотрения, то это станет причиной неудовлетворительной воспроизводимости эксперимента объекта.

Основные требования к факторам:

1) они должны быть управляемыми, т.е. должны обеспечивать возможность поддержки любых из факторов на некотором фиксированном уровне;

2) факторы должны непосредственно воздействовать на объект;

3) факторы должны быть независимыми друг от друга – отсутствие взаимной коррелируемости.

Условно факторы можно классифицировать:

а) по отношению к объекту - режимные и конструктивные,

б) по отношению к возможностям исследователя - активные и пассивные, иногда различают также количественные и качественные факторы.

Получение модели объекта исследования преследует, как правило, следующие цели:

- минимизировать расход материалов на единицу выпускаемой продукции при сохранении ее качества, т.е. произвести замену дорогостоящих материалов на недорогостоящие или дефицитных на распространенные:

- при сохранении качества выпускаемой продукции сократить время обработки в целом или на отдельных операциях, перевести отдельные режимы в не критические зоны, повысить производительность труда, т.е. снизить трудовые затраты на единицу продукции, и т.д.;

- улучшить частные показатели и увеличить общее количество готовой продукции, повысить однородность качества и надежности деталей, сборочных единиц;

- увеличить надежность и быстродействие управления технологическим процессом; снизить ошибки контроля за счет внедрения новых методов и средств контроля.

Разделах «Формализованное представление технологического процесса» и «Проведение вычислительного эксперимента и анализ полученных результатов» для решения задач анализа технологических процессов в частности при

экспериментальном определении модели объекта широко используется на практике метод "черного ящика". Данный метод предусматривает представление объекта некоторым блоком с входными и выходными данными без учета сущности протекающих в нем физико-химических явлений. При изготовлении РЭС данным методом могут определяться параметры технологического процесса (ТП).

Модель динамики объект для решения задач стабилизации режимов и оптимального управления обычно записываются в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений [9]:

$$\dot{z} = f(z, u, t) \quad (1.1)$$

где $z = (z_1, \dots, z_n)^T$ - вектор фазовых координат (вектор состояния) размерности n ; $u = (u_1, \dots, u_m)$ - вектор управления размерности m ; $z = dz / dt$; $f - n$ - вектор функция; T - знак транспонирования.

Наиболее часто объект описывается системой линейных дифференциальных уравнений, т.е.

$$\dot{z} = Az(t) + Bu(t) \quad (1.2)$$

где $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$; $B = \|b_{ij}\|_{n \times m}$ - матрицы параметров объекта соответствующих размерностей, матрицу A называют матрицей системы.

В реальных ТП подача управляющих воздействий обычно производится с временным запаздыванием τ , вызываемым прохождением энергоносителей и сырья по трубопроводам и т.п. Модель (1.2), учитывающая запаздывание по каналу управления, записывается в виде

$$\dot{z} = Az(t) + Bu(t - \tau). \quad (1.3)$$

В простейшем случае объект с одним входом - скалярным управлением u и выходом y (состояние $z = y$) может быть представлен моделью динамики в виде дифференциального уравнения первого порядка

$$\dot{y} = ay(t) + bu(t - \tau). \quad (1.4)$$

Модель (1.4) широко используется для описания технологических операций, связанных с гидравлическими, тепловыми и химическими процессами.

Например, при технологической операции сушки лакокрасочных покрытии в электрической печи в качестве входной переменной x может быть сила тока в нагревательных элементах, а выходной y - температура в печи.

Примерные графики зависимостей $x(t)$ и $y(t)$ объекта с одним входом и выходом представлены на рис. 1.1.

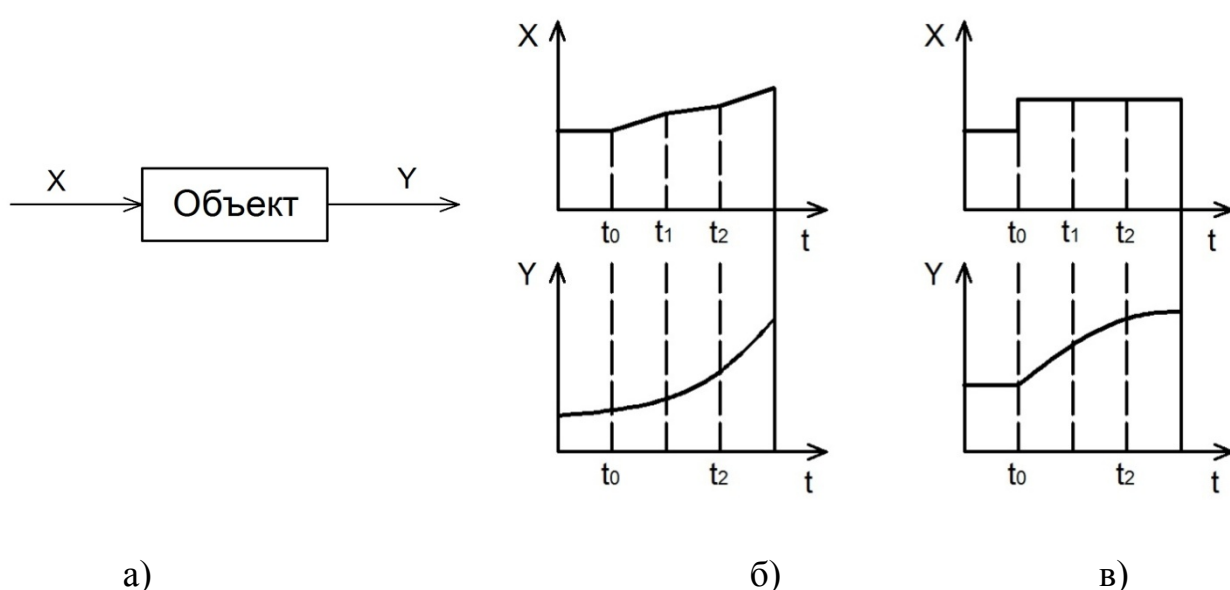


Рис. 20.1. Объект исследования (технологический процесс)

На графике а) представлен объект с одним входом x и выходом y .

На графике б) представлены изменения входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ переменных во времени с монотонно увеличивающимся входным воздействием.

На графике в) представлены изменения входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ переменных во времени со ступенчатым воздействием.

Если вид модели задан, то задача идентификации объекта сводится к задаче оценки параметров, например, для модели вида (1.4) - определению параметров a , b , τ по экспериментальным данным.

Задача идентификации параметров формулируется следующим образом. Задан вид модели. В динамическом режиме на интервале времени (t_0, t_k)

регистрируются значения входа x , выхода y , а если возможно, то и скорости изменения выхода y . Результаты регистрации могут быть представлены траекториями

$$\begin{aligned}\hat{x}(\cdot) &= (\hat{x}(t), t \in [t_0; t_k]), \\ \hat{y}(\cdot) &= (\hat{y}(t), t \in [t_0; t_k]), \\ \hat{y}'(\cdot) &= (\hat{y}'(t), t \in [t_0; t_k])\end{aligned}\quad (1.5)$$

или массивами точечных синхронных замеров с временным шагом Δt

$$\begin{aligned}(\hat{x}_i &= \hat{x}(t_i), i = 1, 2, \dots, N), \\ (\hat{y}_i &= \hat{y}(t_i), i = 1, 2, \dots, N), \\ (\hat{y}'_i &= \hat{y}'(t_i), i = 1, 2, \dots, N).\end{aligned}\quad (1.6)$$

По экспериментальным данным (1.4) или (1.5) требуется рассчитать оценки параметров объекта a, b, τ , при которых отклонения расчетных по модели значений выхода y_i или от экспериментальных y_i или y'_i минимальны. В качестве критерия оптимальности могут использоваться:

- квадратичный (минимизируется сумма квадратов ошибки)

$$J_k = \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min \quad (1.7)$$

или

$$J'_k = \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min \quad (1.7a)$$

- минимизация суммы абсолютных значений ошибки

$$J_{абс.} = \sum_{i=1}^N |\bar{y}_i - \hat{y}_i| \rightarrow \min$$

или

$$J'_{абс.} = \sum_{i=1}^N |\bar{y}_i - \hat{y}_i| \rightarrow \min \quad (1.8a)$$

- минимизация максимального отклонения

$$J_M = \max \{|\bar{y}_i - \hat{y}_i|, i = \overline{1, N}\} \rightarrow \min \quad (1.9)$$

или

$$J_M = \max \{|\bar{y}_i - \hat{y}_i|, i = \overline{1, N}\} \rightarrow \min \quad (1.9a)$$

На практике наиболее часто используется квадратичный критерий, который в ряде случаев позволяет значительно упростить вычисления при оценке параметров объекта. Покажем это на примере идентификации параметров объекта без запаздывания, т.е.

$$\dot{y} = ay(t) + b(x). \quad (1.10)$$

Для этого формально модель ТП представим как модель с входными переменными x и y и выходной переменной y (Рис. 1.2).



Рис. 1.2. Формализованное представление исследуемого объекта при расчете параметров модели динамики методов наименьших квадратов.

В этом случае, используя критерии (1.7,а) и модель (1.9), в соответствии с методом наименьших квадратов можно записать

$$J'_k = \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - ay_i - bx_i)^2 \rightarrow \min_{a,b}$$

Условием минимума функционала J_k является равенство нулю частных производных по a и b , т.е.

$$\frac{dJ'_k}{da} = 0, \frac{dJ'_k}{db} = 0$$

Выполнив дифференцирование и преобразования, получаем систему нормальных уравнений

$$\begin{aligned} a \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 + b \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i &= \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{y}_i \\ a \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 + b \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i &= \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{y}_i \end{aligned} \quad (1.11)$$

В результате формулы для расчета параметров модели принимают следующий вид:

$$\hat{a} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{y}_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i \right)}{\Delta}, \quad (1.12)$$

$$\hat{b} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i x_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{y}_i \right)}{\Delta}, \quad (1.13)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i & \sum_{i=1}^n \hat{x}_i \hat{y}_i \\ \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i & \sum_{i=1}^n x_i \end{vmatrix} = \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{x}_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i \right)^2.$$

Эти формулы не учитывают время задержки τ . Для того, чтобы учесть его, необходимо искусственно ввести время задержки в расчеты, т.е. смещать значения входного воздействия $x(t)$ во времени, каждый раз пересчитывая параметры a и b к значения критерия оптимальности J_k (1.7,а). Процедура поиска продолжается до тех пор, пока не будет найдено наименьшее значение критерия. Полученные значения a , b и τ будут наилучшим образом соответствовать модели исследуемого объекта в смысле минимума суммы квадратов отклонений;

Приближенно параметры объекта могут быть определены графически по кривой разгона. Модель объекта в данном случае записывается в виде

$$T\ddot{y} + y(t) = Kx(t) \quad \text{или} \quad T\ddot{y} + y(t) = Kx(t - \tau) \quad (1.14)$$

где T - постоянная времени объекта, K - коэффициент усиления.

Из сопоставления моделей (1.10) и (1.14) видно

$$a = -1/T; \quad b = K/T.$$

Определение параметров T и K по кривой разгона показано на рис. 1.3.

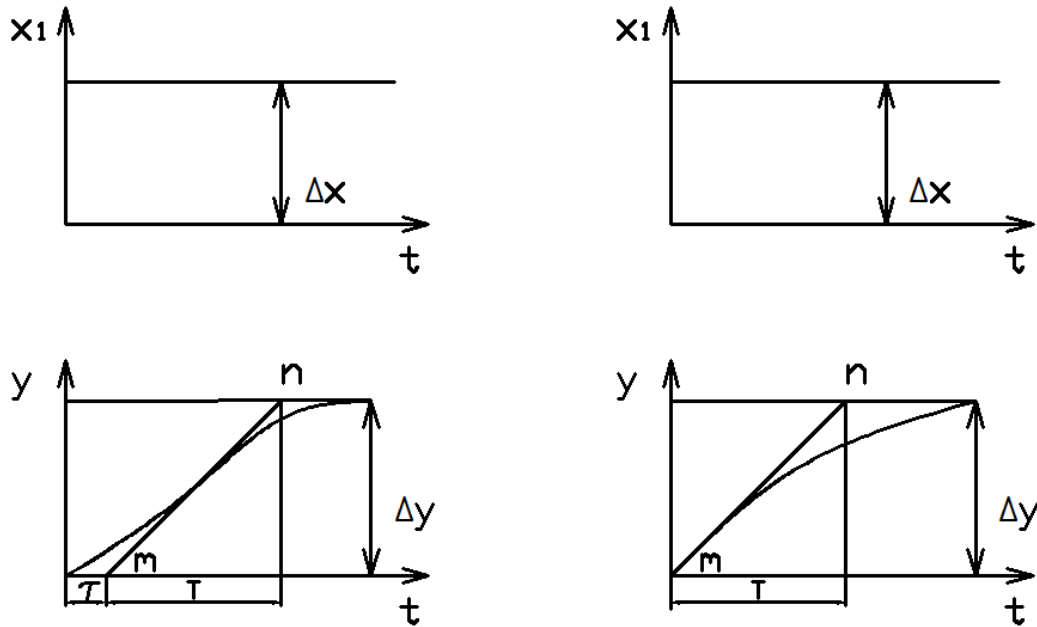


Рис. 1.3. Определение постоянной времени T и коэффициента усиления K по кривой разгона со временем задержки $\tau > 0$ (а) и $\tau = 0$ (б)

Здесь 0 - точка перегиба, mn - касательная к кривой разгона в точке 0 , ограниченная значениями $y(0)$ и U_{\max} . Постоянная времени численно равна проекции касательной на ось времени. Коэффициент усиления равен

$$K = \Delta y / \Delta x = (y_{\max} - y_0) / (X_{\max} - X_0).$$

2.2. Пример расчета параметров модели

Покажем определение параметров модели на примере. Пусть имеются

значения входного воздействия \hat{x}_i и выходные данные t_i, x_i, y_i, y_1 , (табл. 1.1).

Таблица 1.1 Таблица экспериментальных данных

t_i	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
x_i	0,1	0,3	0,35	0,4	0,5	1	2	2,5	3	3
y_i	0,12	0,25	0,35	0,5	1,78	3,72	6,48	13,08	13,09	13,15
y_1	-	0,23	0,25	1,38	3,22	4,7	9,36	6,61	0,07	-

Строим графики зависимостей $x(t)$ и $y(t)$ по полученным данным (Рис.

1.16).

Рассчитаем вручную параметры а и в по трем точкам при $t_i = 1, 2, 3$, т.е. $i =$

2, 4, 6, используя формулы (1.12) и (1.13). В них $\sum_{i \in \{2,4,6\}} \dots$.

$$\Delta = \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{x}_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i \right)^2 = 14,71 \cdot 1,17 \cdot 3,94^2 = 2,69;$$

$$a = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{y}_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{x}_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i \right)}{\Delta} = (17,96 - 18,84) / 2,69 = -0,33$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{x}_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \hat{y}_i \right)}{\Delta} = (18,75 - 14,91) / 2,69 = 1,45.$$

Таким образом, мы получим модель объекта

$$\dot{y}(t) = -0,28y(t) + 1,32x(t).$$

Для получения кривой разгона в ЭВМ вводится постоянное входное воздействие, например, $x = 1$. На экране появятся следующие данные (табл. 1.2).

Таблица 1.2 Данные для построения кривой разгона

t	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
x	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
y	0	0,51	1,21	2,1	3,2	4,21	4,81	5,12	5,31	5,33	5,34

По этим данным строим кривую разгона и определяем коэффициент усиления K и постоянную времени T (Рис. 1.3).

Определим по графику T и K (рис. 1.3.), в нашем случае:

$$T = 3,4; K = \Delta y / \Delta x = 4,7.$$

Найдем параметры а и в

$$a = -1/T - 0,24; b = K / T = 1,38.$$

Таким образом, $\dot{y}(t) = -0,29y(t) + 1,38x(t)$.

Параметры a и b , рассчитанные ЭВМ для этого случая $a = -0,7$; $b = 1,33$. Сопоставим результаты определения параметров различными методами. Для этого рассчитаем значения $y(t)$ по формуле

$$y(t) = e^{a(t-t_0)}(y_0 + bx/a) - bx/a.$$

В данном примере $t_0 = 0$ и $y_0 = 0$. Результаты расчета сведем в табл. 1.3.

Таблица 1.3 Таблица сведенных данные

i	$\hat{y}_{граф.}$	$\hat{y}_{расч.}$	\hat{y}	$\mathcal{E}_{граф.} = y - y_{граф.}$	$\mathcal{E}_{расч.} = y - y_{расч.}$	$\mathcal{E}_{граф.}^2$	$\mathcal{E}_{расч.}^2$
1	0,47	0,50	0,51	0,04	0,01	0,0016	0,0001
2	1,15	1,22	1,21	0,06	0,01	0,0036	0,0001
3	2,03	2,11	2,10	0,07	0,01	0,0049	0,0001
4	3,15	3,22	3,20	0,05	0,02	0,0025	0,0004
5	4,19	4,20	4,21	0,02	0,01	0,0004	0,0001
6	4,71	4,83	4,81	0,10	0,02	0,0100	0,0004
7	4,99	5,15	5,12	0,13	0,03	0,0169	0,0009
8	5,12	5,28	5,31	0,19	0,03	0,0361	0,0009
9	5,15	5,37	5,33	0,18	0,01	0,0324	0,0016
10	5,17	5,38	5,34	0,17	0,04	0,0289	0,0016
y	0	0,51	1,21	2,1	3,2	4,21	4,81

Таким образом, модель с параметрами, рассчитанными методом наименьших квадратов, лучше соответствует экспериментальным данным.

Данный пример рассматривает один из способов построения математической модели.

2.3. Построение математической модели и оценка ее адекватности

Рассмотрим процедуру построения линейных регрессионных моделей ее бывает вполне достаточно для достижения заданных целей.

Процедура построения линейных регрессионных моделей состоит из следующих этапов:

1) запись в явном виде функции $f(x,a)$:

- линейная модель $\hat{y} = a_0 + a_1(x - \bar{x})$;

- нелинейная модель:

$$\hat{y} = a_0 + a_1(x - \bar{x}) + a_2(x - \bar{x})^2 + \dots + a_t(x - \bar{x})^k;$$

k - необходимо определить.

Модель линейная, один фактор выходная величина $y=f(x)$, x – независимая переменная.

Уравнение регрессии имеет вид: $\hat{y} = b_0 + b_1x_1$.

Наша цель найти коэффициенты b_0, b_1 . Будем их находить методом наименьших квадратов.

$$\phi(b_0, b_1) = \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min_{b_0, b_1}$$

Метод наиболее распространенный, придуман 150 лет тому назад ученым Гауссом.

Для k -факторного эксперимента достаточно $k+1$ опыта.

Минимум некоторой функции, если он существует, достигается при одновременном равенстве нулю частных производных по всем неизвестным т.е.

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial b_0} = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial b_1} = 0 \end{cases}$$

Путем математических выводов имеем формулу для любого числа факторов коэффициенты будут равны:

$$b_j = \sum_{i=1}^N \frac{y_i x_{ji}}{n}$$

$j=0, 1, 2, \dots, k$ -номер фактора;

0-записан для b_0 – аддитивная случайная величина с нулевым матожиданием.

Отбор факторов осуществляется, исходя из существенности проблемы.

Для двух факторов коэффициенты вычисляются:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{y}_i \quad b_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{1i} \bar{y}_i \quad b_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{2i} \bar{y}_i$$

После того как коэффициенты $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ – числовые значения их подставляем в уравнение регрессии

Имеем, например: $\hat{y} = 0,37 + 85,6x_1$ – получившаяся модель.

По полученному знаку определяется степень влияния фактора или взаимодействие факторов на целевую функцию.

2) После этого необходимо провести оценку значимости коэффициентов модели и проверку адекватности полученной математической модели.

Целью дисперсионного анализа является вывод об адекватности модели.

Для этого рассчитывают дисперсию адекватности и дисперсию воспроизводимости.

Физический смысл дисперсии адекватности – величина степени неадекватности модели, т.е. отклонение рассчитанных точек от среднего экспериментального.

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$$

m – количество параллельных повторов в каждом опыте.

l – число значимых коэффициентов.

N – количество опытов (число строк в матрице планирования).

Адекватность проверяют по F-критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_b^2}$$

Найденное сравнивают с табличным $F_{табл}$, которое определяется при уровне значимости α .

Для технических расчетов $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы:

$$f_{ad} = N - l \text{ и } f_b = N(m - 1).$$

Если $F_p < F_T$ – модель адекватна.

Если $F_p > F_T$ – модель неадекватна (следовательно, модель нелинейная, либо неучтены все факторы).

Дисперсия воспроизводимости характеризует меру рассеяния экспериментальных данных относительно средних значений

$$S_b^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N(m - 1)}$$

y_{ij} – результаты опытов $y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n}$;

\bar{y}_i – среднее арифметическое из n_i – параллельных опытов;

\hat{y}_i – предсказанное по уравнению регрессии значение в опыте.

3) Проверка значений коэффициентов модели осуществляется 2 способами:

- по t- критерию Стьюдента;

- построением доверительного интервала.

Дисперсия коэффициента регрессии $S_{\{b_i\}}^2$ определяется по формуле:

$$S_{\{b_i\}}^2 = \frac{S_b^2}{N}$$
$$S_{\{b_i\}} = \sqrt{\frac{S_b^2}{N}}$$

Построение доверительного интервала для коэффициента модели δ_{bi} :

$$\delta_{bi} = \pm S_{\{b_i\}} \cdot t$$

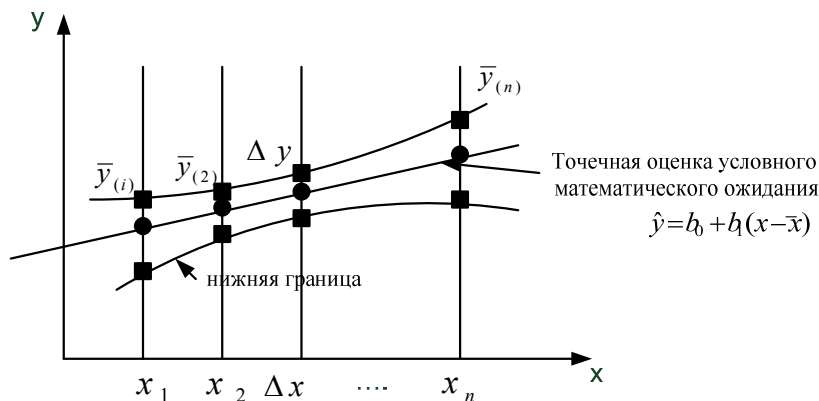
t – критерий Стьюдента определяется из таблиц, при числе степеней свободы, с которым определялась S_b^2 и выбранном уровне значимости (обычно 0,05).

$p=1-\alpha$ – доверительная вероятность $p=\{0,9;0,95;0,99\}$.

$$\underline{b_i} < b_i < \overline{b_i}$$

$$b_0 - t_{(1-\alpha,f)} \cdot S_{\{b_i\}} \leq b_0 \leq b_0 + t_{(1-\alpha,f)} \cdot S_{\{b_i\}}$$

аналогично для b_1 .



4) Проверка однородности экспериментальных данных по критерию Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{\{y_i\}max}^2}{\sum_{i=1}^N S_{\{y_i\}}^2}$$

Выбирается max построчная дисперсия и берется отношение Σ всех построчных дисперсий

y_1	y_2	y_3	$S^2_{\{y_i\}}$
			$\Sigma \dots$

Построчная дисперсия определяется по формуле:

$$S_{\{y_i\}}^2 = \sum_1^m \frac{(y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m - 1}$$

Коэффициент Кохрена показывает какую долю в общей сумме построчных дисперсий занимает max из них.

При идеальной однородности $G_p \rightarrow \frac{1}{N}$

G_p сравним G_T (α и числа степени свободы $\frac{f_1}{f_2} \frac{f_1 - m - 1}{f_2 - N}$)

$G_p < G_T$ – дисперсия однородная

Также сравнивается $S_{ad}^2(y) \geq S_b^2(y)$

1) $S_{ad}^2(y) > S_b^2(y)$ – модель плохая, нужно больше параметров

2) $S_{ad}^2(y) < S_b^2(y)$ – слишком «хорошая», нужно уменьшить параметры

(модель описывает погрешность)

3) Различия незначимо – хорошая модель, если таких моделей

несколько выбрать самую простую.

Рекомендуемая литература:

- 1 Проектирование и технология радиоэлектронных средств: учебное пособие / З. М. Селиванова [и др.]; Тамб. гос. техн. ун-т. - Тамбов: ТГТУ, 2011. - 164 с.
- 2 Кольтюков, Н.А. Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств [Электронный ресурс]: учеб. пособие для студ. обучающихся по направл. 210200, 210300 / Н. А. Кольтюков, О. А. Белоусов. - Тамбов: ТГТУ, 2009.– Режим доступа: http://window.edu.ru/window_catalog/files/r68310/Koltukov-1.pdf - Заглавие с экрана.
- 3 Проектирование и технология электронных средств: учебное пособие / З. М. Селиванова, Д. Ю. Муромцев, О. А. Белоусов; Тамб. гос. техн. ун-т. - Тамбов: ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2012. - 140 с.
- 4 Основы эргономики и дизайна РЭС : учебное пособие по курсовому проектированию / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 124 с.
- 5 Баканов, Г. Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учеб. пособие / Г. Ф. Баканов, С. С. Соколов, В. Ю. Суходольский. Изд-во: Академия, 2007. -368с.
- 6 Основы конструирования и технологии РЭС: учеб. пособие для вузов / Ю. Л. Муромцев [и др.]. - Тамбов: ТВВАИУ, 2007. - 267 с.
- 7 Белоусов, О.А. Основные конструкторские расчеты в РЭС [Электронный ресурс]: учеб. пособие / О.А. Белоусов, Н.А. Кольтюков, А.Н. Грибков. Тамбов: Изд-во Тамб.гос.тех.ун-та, 2007. – Режим доступа: http://window.edu.ru/window_catalog/files/r56836/k_Belousov.pdf - Заглавие с экрана.
- 8 Кольтюков, Н.А. Экранирование в конструкциях РЭС [Электронный ресурс]: методические указания по выполнению лабораторных работ. (учебно-методическая разработка) / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2007. – Режим доступа: http://window.edu.ru/window_catalog/files/r56800/k_Koltukova.pdf - Заглавие с экрана.
- 9 Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / К.И. Билибин, [и др.] - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.-528 с.
- 10 Конструирование радиоэлектронных средств, часть II. Программа. Метод. указания и контрольные работы/сост. Ю.Л. Муромцев, А.В. Ивановский, А.П. Пудовкин. – Тамбов, ТГТУ, 1996. – 33с. 10
- 11 Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств: учебное пособие/Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов.- Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Техн. Ун-та, 2009.-84с.