

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Кафедра электронной техники и технологии

В.Л. Ланин, А.А. Хмыль

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по дисциплинам

“ТЕХНОЛОГИЯ РЭУ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА”,
“ТЕХНОЛОГИЯ ЭВС”

для студентов специальностей
“Проектирование и производство РЭС”,
“Электронно-вычислительные средства”
всех форм обучения

Минск 2003

УДК 621.396.6.002 (075.8)

ББК 32.844 я 73

Л 22

- Л 22 Ланин В.Л.
Лабораторные работы по дисциплинам «Технология РЭУ и автоматизация производства», «Технология ЭВС» для студентов специальностей “Проектирование и производство РЭС”, “Электронно-вычислительные средства” всех форм обучения / В.Л. Ланин, А.А. Хмыль– Мн.: БГУИР, 2003. –50 с.: ил.
ISBN 985-444-474-0

Лабораторные работы включают в себя исследования точности и настроенности технологических процессов сборки электронных блоков, образования неразъемных соединений склеиванием, изготовления печатных плат комбинированными методами.

Предназначены для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы с технологическим оборудованием и специализированной оснасткой.

УДК 621.396.6.002 (075.8)

ББК 32.844 я 73

© В.Л. Ланин,
А.А. Хмыль, 2003

© БГУИР, 2003

ISBN 985-444-474-0

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА

Цель работы

Изучение расчетного и статистического метода анализа точности технологического процесса, разработка модели процесса методом планирования эксперимента с применением ЭВМ.

Теоретические сведения

Вопросы технологической точности занимают важное место в производстве РЭУ и от их правильного решения зависят качество и надежность изделий, а также экономические показатели предприятия. Недооценка вопросов точности неизбежно приводит либо к браку, либо к усложнению технологических процессов и повышению стоимости изделий.

При изготовлении сборочных единиц РЭУ функциональная точность выходных параметров блоков определяется прежде всего производственным разбросом параметров деталей, поступающих на сборку, а также нестабильностью технологических операций сборки. Разброс является следствием несовершенства поступающих материалов, технологических процессов изготовления этих деталей и последующей их разбраковки по классам.

Для оценки влияния погрешностей параметров отдельных деталей на величину производственной погрешности выходного параметра сборочных единиц в том случае, если имеется аналитическое выражение выходного параметра в общем виде

$$П = f(q_1, q_2, \dots, q_k), \quad (1.1)$$

где $П$ - выходной параметр сборочной единицы; q_i - параметры деталей, входящих в сборку, используют расчетно-аналитический метод.

После дифференцирования выражения (1.1) и замены дифференциалов конечными приращениями получим

$$\Delta П = \sum_{i=1}^k \frac{\partial П}{\partial q_i} \Delta q_i, \quad (1.2)$$

где k - количество деталей, участвующих в сборке изделия.

Но на практике удобнее пользоваться не абсолютными значениями параметров, а относительными. Для этого уравнение (1.2) разделим на уравнение (1.1) и, произведя некоторые преобразования, получим

$$\frac{\Delta П}{П} = \sum_{i=1}^k A_i \frac{\Delta q_i}{q_i}, \quad (1.3)$$

где A_i - коэффициент влияния i -го параметра на погрешность выходного параметра

$$A_i = \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} \frac{q_i}{\Pi}. \quad (1.4)$$

Используя уравнение (1.3), можно однозначно определить величину производственной погрешности выходного параметра при заданных погрешностях параметров элементов, если известны величины A_i . Для расчета коэффициентов влияния широко используют расчетный и статистические методы (малых приращений, корреляционный, планирования эксперимента и регрессионного анализа).

Расчетный метод требует обязательного получения аналитического выражения выходного параметра как функции всех параметров элементов сборочной единицы, что не всегда представляется возможным. В таких случаях используют экспериментальные методы. При этом наибольшими возможностями обладает метод статистического планирования эксперимента, который в сочетании с регрессионным анализом опытных данных позволяет получить математические модели для изделий, содержащих элементы как с линейными, так и с нелинейными параметрами. Расчет сопровождается статистически строгой оценкой адекватности полученного уравнения и значимости его коэффициентов.

При **планировании эксперимента** искомая модель должна быть в виде полинома, который в общем виде может быть представлен уравнением

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1.5)$$

где y - выходной параметр (критерии оптимизации); b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} - коэффициенты уравнения регрессии.

Основной чертой планирования является четкая программа проведения опыта на выбранных экспериментатором уровнях. Центр плана, т.е. точка, в окрестности которой ставится серия опытов, выбирается на основе априорных сведений о процессе. Для удобства обработки результатов опыта вводится кодирование независимых входных факторов x_i :

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}, \quad (1.6)$$

где X_{0i} - основной уровень; ΔX_i - интервал варьирования.

Факторы в процессе эксперимента принимают нормированные значения, равные +1 и -1 (табл. 1.1). Число опытов в неполном факторном эксперименте (ПФЭ) зависит от числа факторов K и определяется как $N=2^K$. Для $K=3$ матрица планирования приведена в табл. 1.2.

По данным табл. 1.2 получают математическую модель для оценки выходного параметра в виде

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (1.7)$$

Таблица 1.1

Начальные условия эксперимента

Значения факторов	X ₁	X ₂	X ₃
Основной уровень X _{0i}			
Интервал варьирования ΔX _i			
Верхний уровень (+1)			
Нижний уровень (-1)			

Таблица 1.2

Матрица планирования эксперимента 2³

№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Выходной параметр		
									Y ₁	Y ₂	Y ₃
1	+	+	+	+	+	+	+	+			
2	+	+	-	+	-	+	-	-			
3	+	-	+	+	-	-	+	-			
4	+	-	-	+	+	-	-	+			
5	+	+	+	-	+	-	-	-			
6	+	+	-	-	-	-	+	+			
7	+	-	+	-	-	+	-	+			
8	+	-	-	-	+	+	+	-			

Коэффициенты регрессии определяют по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i; \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i; \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_j \bar{y}_i. \quad (1.8)$$

Дисперсия среднего арифметического в строке матрицы:

$$\sigma^2 \{y\} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2, \quad (1.9)$$

где m - количество параллельных опытов.

Дисперсия коэффициентов регрессии:

$$\sigma^2 \{b_i\} = \frac{\sigma^2 \{y\}}{Nm}. \quad (1.10)$$

Оценка значимости коэффициентов регрессии проводится с помощью **t-критерия Стьюдента**. Если $b_i < t_{табл} \sigma \{b_i\}$, то коэффициент считается незначимым. Значения критерия Стьюдента $t_{табл}$ определяются по данным табл. 2 приложения в зависимости от числа степеней свободы $f_i = N(m-1)$ и выбранного уровня значимости. Для оценки адекватности полученной математической модели, т.е. достаточно полного количественного описания процесса, используют **F-критерий Фишера**

$$F = \frac{\sigma_{ag}^2}{\sigma^2\{y\}}, \quad (1.11)$$

где σ_{ag}^2 - дисперсия адекватности, определяемая

$$\sigma_{ag}^2 = \frac{1}{N - \alpha} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (1.12)$$

здесь α - число значимых членов в уравнении регрессии; \hat{y}_i - значение выходного параметра, полученное расчетным путем из математической модели.

Если $F < F_{табл}$, то модель признается адекватной. $F_{табл}$ определяется по данным табл. 3 приложения в зависимости от числа степеней свободы $f_1 = N(m-1)$, $f_2 = N - \alpha$ и выбранного уровня значимости.

При $F > F_{табл}$ модель считается неадекватной и эксперимент необходимо повторить, уменьшив интервалы варьирования либо увеличив количество параллельных опытов m . Для ускорения процесса вычисления статистических характеристик используют ЭВМ.

Из других методов влияния чаще применяют **метод малых приращений**. Он основан на линейности уравнения (1.3), из чего следует принцип независимости действия погрешностей параметров. При малом отклонении одного параметра q_1 от номинального и сохранении постоянными значений других параметров погрешность выходного параметра $\Delta\Pi/\Pi$ будет определяться только погрешностью параметра q_1 :

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = A_1 \frac{\Delta q_1}{q_1}. \quad (1.13)$$

Отсюда коэффициент влияния

$$A_1 = \frac{\Delta\Pi}{\Delta q_1} \cdot \frac{q_1}{\Pi}. \quad (1.14)$$

Определив тем или иным способом коэффициенты влияния, вычисляют среднее значение и поле рассеяния относительной погрешности выходного параметра по формулам:

$$M\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sum_{i=1}^k A_i M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right); \quad (1.15)$$

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^k A_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + 2r_{ij} A_i A_j \delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) \delta\left(\frac{\Delta q_j}{q_j}\right)}, \quad (1.16)$$

где r_{ij} - коэффициент корреляции между i - и j - параметрами; $M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right), \delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)$ - среднее значение относительной погрешности и половина поля допуска на параметр.

Эти уравнения справедливы в том случае, если распределение производственных погрешностей параметров отдельных элементов подчиняется нормальному закону и симметрично относительно среднего значения. Но в результате

действия доминирующих факторов, смещения партий, выборов и т.п. практические кривые распределения отклоняются относительно значений, заложенных в технических условиях (ТУ) на элементы. Количественно эти отклонения оцениваются коэффициентами асимметрии β_i и рассеяния k_i :

$$\beta_i = \frac{M_{X_i} - M_{X_i(TU)}}{\delta_i(TU)}; \quad (1.17)$$

$$k_i = \frac{S_{ni}}{2\delta_i(TU)}, \quad (1.18)$$

где $\delta_i(TU)$ - половина поля допуска на параметр, определяемая по ТУ; S_{ni} - величина поля рассеяния параметра, определяемая экспериментально.

Для вычисления величин β_i и k_i используют статистический метод анализа производственных погрешностей, основанный на обработке большого количества однородного экспериментального материала. В результате обработки определяются закон распределения производственных погрешностей (при помощи критериев Пирсона χ^2 или Колмогорова λ) и его параметры. Основными законами, применяемыми в технологии радиоэлектронной аппаратуры, являются: нормальный, равновероятный и обобщенный типа А.

В процессе сборки электронных блоков параметры элементов могут изменяться под воздействием технологических операций пайки, герметизации, электротермотренировки. Анализ распределения параметров резисторов и конденсаторов после пайки показывает, что смещение центра группирования незначительно, в то время как статистические характеристики параметров транзисторов испытывают более значительное изменение. Под воздействием пайки коэффициент усиления транзистора уменьшается в среднем на 6%, при этом среднее квадратическое отклонение параметра снижается на 4%.

Используя значение величин β_i и k_i , вычисляют среднее значение и поле рассеяния относительной погрешности выходного параметра:

$$M\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sum_{i=1}^K A_i \beta_i M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right); \quad (1.19)$$

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^k A_i^2 k_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + 2r_{ij} A_i A_j k_i k_j \delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) \delta\left(\frac{\Delta q_j}{q_j}\right)}. \quad (1.20)$$

Описание лабораторного макета

В качестве исследуемой сборочной единицы в работе выбран УНЧ, собранный на транзисторе МП41 по схеме с общим эмиттером и предназначенный для усиления синусоидальных колебаний в диапазоне частот 100...6000 Гц. Электрическая схема макета УНЧ представлена на рис. 1.1. Выходным параметром данного изделия является коэффициент усиления по напряжению, который на средней частоте диапазона определяется по формуле

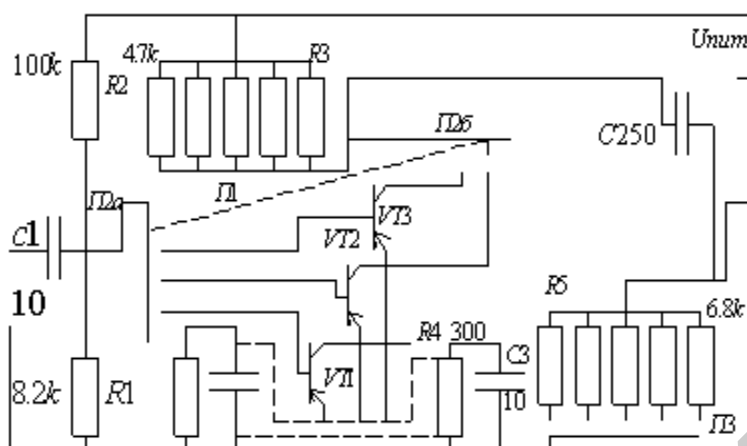


Рис.1.1. Электрическая схема макета для определения производственных погрешностей выходных параметров УНЧ

$$K_c = \frac{h_{21} \cdot R_{нэ}}{h_{11} + \Delta h \cdot R_{нэ}}, \quad (1.21)$$

где $R_{нэ}$ - эквивалентная нагрузка каскада, образованная параллельным соединением резисторов R_3 и R_5 ; Δh - определитель матрицы h -параметров транзистора,

$$\Delta h = h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}. \quad (1.22)$$

Здесь h_{11} - входное сопротивление транзистора, при коротком замыкании на выходе; h_{12} - коэффициент обратной связи по напряжению; h_{21} - коэффициент передачи по току; h_{22} - выходная проводимость транзистора в режиме холостого хода на входе.

Порядок выполнения работы

1. Изучить описание к лабораторной работе, ознакомиться с электрической схемой блока.
2. Рассчитать коэффициент усиления УНЧ на средней частоте диапазона для заданных параметров транзистора МП41 и номинальных значений резисторов R_3 и R_5 .
3. Составить матрицу планирования ПФЭ для $K=3$ с учетом варианта индивидуального задания (табл. 1.3).
4. Собрать макет для исследования влияния элементов схемы на выходные параметры блока (рис.1.2). Включить питание макета. Подать на вход УНЧ напряжение 5,0 мВ частотой 1000 Гц от генератора низкой частоты (ГНЧ).
5. Измерить вольтметром ВЗ-38 напряжение на выходе УНЧ, при этом на экране осциллографа должна наблюдаться синусоидальная форма сигнала. В случае искажений скорректировать величину входного сигнала. Определить коэффициент усиления УНЧ при номинальных значениях всех параметров $K_{сн}$ и сравнить его с расчетным.

Таблица 1.3

Варианты индивидуальных заданий

Параметр	Номер варианта				
	1	2	3	4	5
4,7 кОм	±10	±10	±10	±20	±10
6,8 кОм	±10	±10	±10	±20	±10
80	±10	±20	—	±20	±20
2,2 кОм	—	—	±20	±20	±20

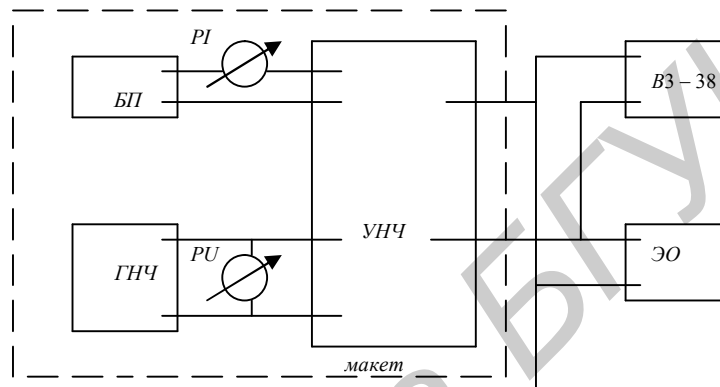


Рис.1.2. Схема исследования погрешностей выходных параметров УНЧ

6. Провести эксперимент в соответствии с матрицей планирования при $m=3$; результаты измерений оформить в виде табл.1.1 и 1.2.

7. Провести обработку статистических данных по стандартной подпрограмме на ПЭВМ. В результате расчета составить математическую модель для выходного параметра блока, проверить коэффициенты в уравнении регрессии на достоверность, а полученную модель на адекватность по F -критерию Фишера.

8. Определить частные коэффициенты влияния параметров q_i на выходной параметр K_c методом малых приращений. Для этого один из параметров q_i изменить на ± 10 или $\pm 20\%$ от номинального значения (в соответствии с вариантом индивидуального задания), а остальные параметры поддерживать на номинальном уровне. Результаты измерений и расчетов занести в табл.1.4.

9. На основании расчетов составить математическую модель с использованием коэффициентов, полученных методом малых приращений.

10. Провести исследование закона распределения производственных погрешностей элементов схемы, для чего измерить на другом макете параметры партии элементов (R, h_{21}) в количестве, задаваемом преподавателем.

11. Используя стандартную программу HIST, привести обработку статистических данных на ПЭВМ, рассчитать величины K_i и β_i , построить гистограмму распределения производственных погрешностей элементов схемы.

Таблица 1.4

Расчет коэффициентов влияния.

Параметр	$\frac{\Delta q_i}{q_i} \cdot 100\%$	K_{ci}	$A_i = \frac{\Delta K_i \cdot q_i}{K_{сн} \cdot \Delta q_i}$	$A_{иср}$
q_1-R_3	+10			
	-10			
	+20			
	-20			
q_2-R_5	+10			
	-10			
	+20			
	-20			
q_3-h_{21}	+10			
	-10			
	+20			
	-20			
q_4-h_{11}	+10			
	-10			
	+20			
	-20			

12. С учетом величин K_i и β_i , коэффициента корреляции r , а также погрешностей, вносимых процессом пайки, вычислить среднее значение $M(\Delta K / K)$ и величину поля допуска погрешности коэффициента усиления $\delta(\Delta K / K)$.

13. Провести анализ полученных математических моделей, определить наиболее влияющие параметры блока, предложить мероприятия по уменьшению погрешности коэффициента усиления.

Содержание отчета

1. Схема электрическая принципиальная электронного блока.
2. Матрица планирования ПФЭ.
3. Основные расчетные формулы и расчеты по ним.
4. Таблицы экспериментальных данных и распечатки моделей.
5. Гистограммы распределения производственных погрешностей R , h .
6. Анализ коэффициентов влияния и расчет величины поля допуска погрешности коэффициента усиления.

Контрольные вопросы

1. Сущность методов.
2. Коэффициент влияния и методы его определения.
3. Методика полного факторного эксперимента.
4. Как оценивается значимость коэффициента уравнения регрессии и адекватность модели при ПФЭ?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ РЭС ПРИ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Цель работы

Построение математической модели многооперационного технологического процесса методом корреляционного анализа и оценка его точности.

Теоретические сведения

Все технологические операции производства РЭУ по их влиянию на выходные параметры электронных блоков условно можно разбить на три основные группы:

активные формирующие, в процессе которых формируются выходные параметры блока (сборочно-монтажные операции);

активные преобразующие, в результате которых изменяются количественные показатели выходных параметров блока (герметизация, термотренировка и др.);

пассивные, которые не влияют на количественные показатели выходных параметров (покраска, маркировка, контроль).

Технологический процесс производства электронных блоков можно представить в виде схемы, состоящей из ряда технологических операций: формирующих, преобразующих и пассивных (рис. 2.1).

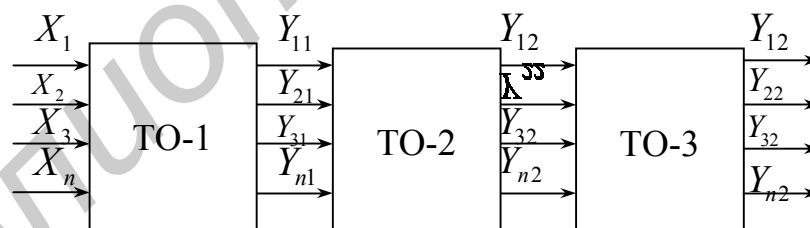


Рис. 2.1. Схема многооперационного технологического процесса:
ТО-1 - формирующая, ТО-2 - преобразующая, ТО-3 - пассивная операции

На вход первой формирующей операции поступают компоненты и детали со своими параметрами $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. На выходе его образуются новые показатели блока $Y_{11}, Y_{21}, Y_{31}, \dots, Y_{n1}$, которые после преобразующей операции приобретают значения $Y_{12}, Y_{22}, Y_{32}, \dots, Y_{n2}$.

Основная задача анализа точности многооперационного технологического процесса состоит в том, чтобы определить количественные показатели влияния технологических операций по результатам изменения входных и выходных характеристик блоков. Для оценки точности и устойчивости технологических процессов применяют ме-

тод точностных диаграмм, основанный на построении кривых распределения производственных погрешностей изучаемого параметра во времени. На оси абсцисс откладывают отрезки времени, соответствующие выполняемым технологическим операциям, по завершении которых небольшие партии изделий (25-30 шт.) подвергают статистическому анализу. На оси ординат откладывают вычисление для каждой группы значения среднего арифметического \bar{y}_i , среднего квадратического отклонения σ и поля рассеяния S_{ni} . Соединяя последовательно точки, соответствующие средним значениям выходного параметра получают временную функцию (рис. 2.2).

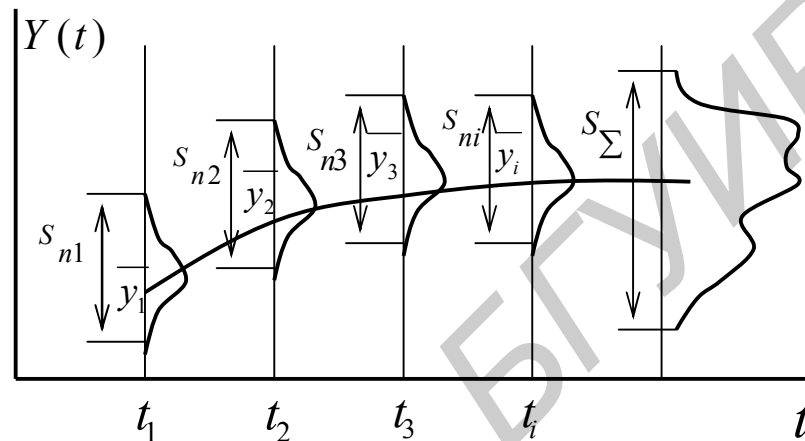


Рис.2.2. Точностная диаграмма многооперационного процесса

По точностной диаграмме можно выявить влияние систематических погрешностей на точность выходных параметров блока и определить устойчивость технологического процесса. Степень устойчивости процесса по параметру Y определяется коэффициентом устойчивости T_y , $T_y \geq 0,95$.

$$T_y = \frac{\sigma_i}{\sigma_\Sigma}, \quad (2.1)$$

где σ_i - среднее квадратическое отклонение по операциям в моменты t_1, t_2, \dots, t_i ; σ_Σ - суммарное среднее квадратическое отклонение на выходе процесса.

При многооперационном технологическом процессе на каждой технологической операции входные погрешности частично компенсируются, частично переносятся на следующую операцию, появляются новые составляющие погрешности под действием систематических и случайных возмущений, сопутствующих данной операции.

Чтобы определить величину переносимой и вновь образуемой погрешности, применяют корреляционный анализ статистических данных, полученных для каждой операции технологического процесса, и рассчитывают уравнения регрессии. Если распределения большого числа наблюдений выходных параметров функциональных модулей после каждой операции подчиняются нормальному закону, то уравнение регрессии выражается прямой линией:

$$\overline{\Pi}_{\text{вых}} = a_0 + a_1 \overline{\Pi}_{\text{вх}}, \quad (2.2)$$

где a_0, a_1 - среднее значение выходного параметра на входе и выходе операции; $\overline{\Pi}_{\text{вых}}$, $\overline{\Pi}_{\text{вх}}$ - параметры уравнения регрессии.

Линия регрессии показывает, как в среднем изменяется параметр на выходе данной операции при соответствующем изменении его на входе. Коэффициент a_0 определяет систематическую погрешность, вызываемую технологией, и рассчитывается следующим образом:

$$a_0 = \overline{\Pi}_{\text{вых}} - a_1 \overline{\Pi}_{\text{вх}} . \quad (2.3)$$

Коэффициент a_1 показывает, какая часть погрешности выходного параметра до операции переходит в погрешность после операции, и определяется по уравнению

$$a_1 = r \frac{\sigma(\overline{\Pi}_{\text{вых}})}{\sigma(\overline{\Pi}_{\text{вх}})} , \quad (2.4)$$

где r - коэффициент корреляции, который показывает тесноту связи между производственными погрешностями выходного параметра до и после технологической операции; $\sigma(\overline{\Pi}_{\text{вх}})$, $\sigma(\overline{\Pi}_{\text{вых}})$ - средние квадратические отклонения производственных погрешностей выходного параметра до и после операции.

При определении коэффициента корреляции удобно пользоваться понятиями моментов, которые в математической статистике разделяются на начальные, центральные и основные. Начальным моментом \mathcal{G}_h , вычисленным относительно условного начала, называется сумма произведений отклонений значений статистического ряда Π_i от Π_0 в степени h на соответствующую частоту (n_i / N) :

$$\mathcal{G}_h = \sum_{i=1}^N (\Pi_i - \Pi_0) \left(\frac{n_i}{N} \right) , \quad (2.5)$$

где n_i - число значений Π_i в статистическом ряду; N - общее количество наблюдений.

Вычисление начальных моментов значительно упрощается, если его производить относительно нуля, т.е. $\Pi_0 = 0$. В этом случае начальный момент первого порядка равен математическому ожиданию (среднему значению) статистического ряда.

Центральный момент μ_h представляет собой сумму произведений отклонений значений статистического ряда Π_i относительно среднего значения $\overline{\Pi}$ в степени h на соответствующую частоту:

$$\mu_h = \sum (n_i - n_o)^h \left(\frac{n_i}{N} \right) . \quad (2.6)$$

Центральный момент второго порядка легко выражается через начальный момент второго порядка и представляет собой дисперсию ряда распределения σ^2 , где среднее квадратическое отклонение $\sigma = +\sqrt{\mu_2}$.

При рассмотрении рядов распределений двух взаимосвязанных величин пользуются понятиями начальных и центральных смешанных моментов, полу-

чение аналитических выражений которых не вызывает затруднений по аналогии с уравнениями (2.5) и (2.6).

Отношение соответствующего смешанного центрального момента к средним квадратическим отклонениям в соответствующей степени называется **коэффициентом корреляции**:

$$r_{h_1 / h_2} = \frac{\mu_{h_1 / h_2}}{\sigma_{n_{ex}}^{h_1} \cdot \sigma_{n_{вых}}^{h_2}}. \quad (2.7)$$

Коэффициент корреляции рассчитывают в такой последовательности:

а) средние значения выходного параметра до и после операции

$$\bar{P}_{ex} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ex i}}{N}; \quad \bar{P}_{вых} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{вых i}}{N}; \quad (2.8)$$

б) начальные моменты второго порядка

$$\mathcal{G}_{2ex} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ex i}^2}{N}; \quad \mathcal{G}_{2вых} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{вых i}^2}{N}; \quad (2.9)$$

в) центральные моменты второго порядка

$$\mu_{2ex} = \mathcal{G}_{2ex} - (\bar{P}_{ex})^2; \quad \mu_{2вых} = \mathcal{G}_{2вых} - (\bar{P}_{вых})^2; \quad (2.10)$$

г) средние квадратические отклонения

$$\sigma(P_{ex}) = \sqrt{\mu_{2ex}}; \quad \sigma(P_{вых}) = \sqrt{\mu_{2вых}}; \quad (2.11)$$

д) начальный и центральный моменты связи

$$\mathcal{G}_{11} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ex i} P_{вых i}}{N}; \quad \mu_{11} = \mathcal{G}_{11} - \bar{P}_{ex} \bar{P}_{вых}; \quad (2.12)$$

е) коэффициент корреляции

$$r = \frac{\mu_{11}}{\sigma(P_{ex}) \sigma(P_{вых})}. \quad (2.13)$$

Средняя квадратическая ошибка определения r

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{N}}. \quad (2.14)$$

Значимость коэффициента корреляции определяют по номограмме, приведенной на рис. 2.3, в зависимости от уровня вероятности P и числа экспериментальных данных N .

Если основными технологическими операциями при изготовлении функциональных модулей РЭС являются пайка, заливка и термотренировка, то уравнение регрессии, связывающее расчетное среднее значение выходного параметра с тем значением, которое будет после изготовления узла, имеет вид

$$\bar{\Pi}_{\text{вых}} = \{a_{0T} + a_{1T} \cdot [a_{03} + a_{13} \cdot (a_{0n} + a_{1n} \cdot \bar{\Pi}_{\text{ex}})]\}, \quad (2.15)$$

где a_{0n}, a_{03}, a_{0T} - систематические погрешности выходного параметра на операциях пайки, заливки и термотренировки; a_{1n}, a_{13}, a_{1T} - коэффициенты переноса систематической погрешности на операциях пайки, заливки и термотренировки; $\bar{\Pi}_{\text{ex}}$ - математическое ожидание выходного параметра функционального модуля перед пайкой, т.е. расчетное значение.

Средняя квадратическая погрешность выходного параметра после каждой операции определяется по правилу суммирования случайных погрешностей

$$\sigma(\bar{\Pi}_{\text{вых}}) = \sqrt{\sigma\left(\frac{\bar{\Pi}_{\text{вых}}}{\bar{\Pi}_{\text{ex}}}\right) + a_1^2 \sigma(\bar{\Pi}_{\text{ex}})}. \quad (2.16)$$

Первое слагаемое уравнения представляет собственную случайную погрешность операции:

$$\sigma\left(\frac{\bar{\Pi}_{\text{вых}}}{\bar{\Pi}_{\text{ex}}}\right) = \frac{a_1 \sqrt{1 - r^2}}{r} \sigma(\bar{\Pi}_{\text{ex}}), \quad (2.17)$$

а второе - долю случайной погрешности выходного параметра, переходящей со входа операции на выход.

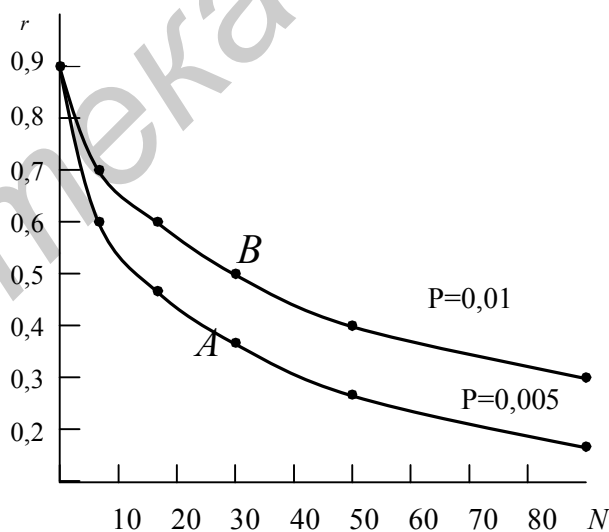


Рис.2.3. Номограмма значимости коэффициента корреляции:
А - незначимый, В - значимый, В - весьма значимый

Описание лабораторного макета

В качестве объекта исследования выбран мультивибратор, выполненный в микромодульном варианте (рис.2.4).

Основными выходными параметрами мультивибратора в автоколебательном режиме являются амплитуда напряжения на нагрузке U_{mn} , длительность

импульса t_u и частота колебаний f , для которых справедливы следующие равенства:

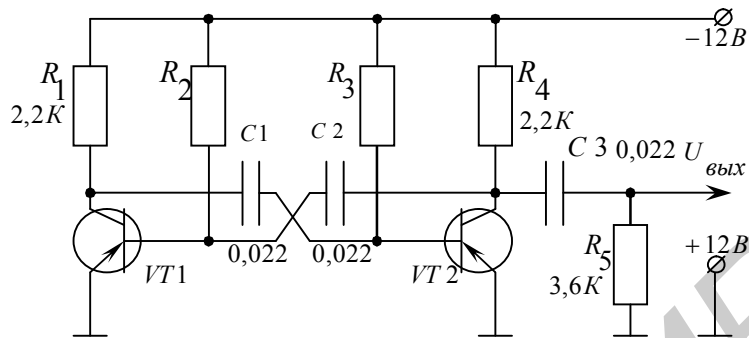


Рис. 2.4. Схема мультивибратора

$$U_{mn} = \frac{E_k \cdot R_5}{R_5 + R_4}; \quad (2.18)$$

$$t_u \approx 0,7 C_1 R_3; \quad (2.19)$$

$$f = \frac{1}{0,7(C_1 R_3 + C_2 R_2)}. \quad (2.20)$$

Отобранные функциональные модули (ФМ) после операций пайки, заливки и термотренировки (по 25 шт.) смонтированы на трех печатных платах. Питание всех ФМ осуществляется от источника стабилизированного напряжения через выключатель П1. Контрольные приборы подключаются к клемме "U_{вых}". Соединение выхода каждого модуля с контрольными приборами осуществляется через переключатель П2 и контакты шагового искателя, который приводится в действие кнопкой "Кн1".

Порядок выполнения работы

1. Изучить описание к лабораторной работе, ознакомиться с электронной схемой блока.
2. Рассчитать амплитуду напряжения на нагрузке U_{mn} , длительность t_u и частоту импульсов f по формулам (2.18) - (2.20).
3. Собрать схему измерения выходных параметров функционального модуля (рис.2.5).
4. Установить переключатель П2 в положение I "ПАЙКА". Включить питание макета.
5. Произвести измерение выходного параметра, заданного преподавателем. При каждом измерении на световом табло высвечивается номер контролируемого функционального узла.

6. Установить переключатель П2 сначала в положение 2 "ЗАЛИВКА", а затем 3 "ТЕРМОТРЕНИРОВКА" и произвести измерения выходного параметра. Результаты измерений занести в табл. 2.1.

7. Используя стандартную программу, рассчитать на ПЭВМ для каждой технологической операции среднее значение выходного параметр $\Pi_{\text{вых}}$, среднюю квадратическую погрешность. Построить точностную диаграмму многооперационного технологического процесса, рассчитать коэффициент устойчивости T_y по каждой операции.

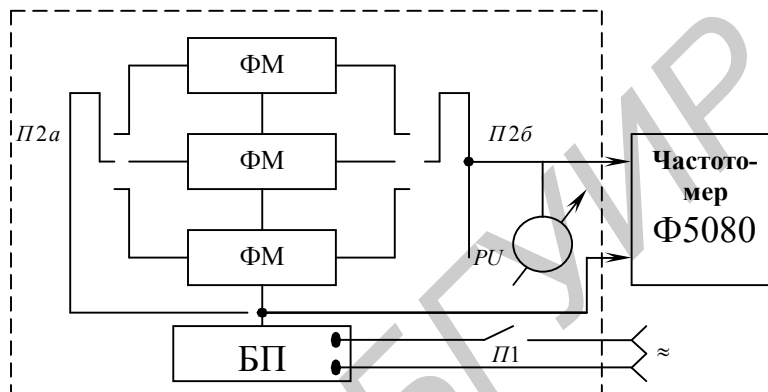


Рис. 2.5. Схема измерения параметров ФМ

8. Используя стандартную программу, рассчитать на ПЭВМ коэффициенты корреляции r , параметры уравнения регрессии a_0, a_1 характеризующие тесноту связи погрешностей выходного параметра между операциями пайка-заливка, заливка-термотренировка. Заполнить графы табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты экспериментов и расчетов

Контролируемый параметр	Показатели операции	Сборка и пайка	Заливка	Термотренировка
Частота импульсов f	$\overline{\Pi_{\text{вых}}}$			
Длительность t_u	$\sigma(\Pi_{\text{вых}})$			
	r			
	a_1			
	a_0			
	$\sigma\left(\frac{\overline{\Pi_{\text{вых}}}}{\Pi_{\text{вх}}}\right)$			

9. Построить графически точностную диаграмму многооперационного процесса и оценить влияние каждой операции на среднее значение выходного параметра и его погрешность.

Содержание отчета

1. Схема измерения параметров функционального модуля.
2. Расчеты U_{mn} , t_u и f .
3. Точностная диаграмма многооперационного процесса, расчеты коэффициентов устойчивости по операциям.
4. Результаты экспериментальной работы и расчетов (табл.2.1).
5. Аналитические выражения и графики моделей технологического процесса.
6. Результаты анализа моделей и точностной диаграммы.

Контрольные вопросы

1. Структура многооперационного технологического процесса.
2. Точностные диаграммы и коэффициент устойчивости технологического процесса.
3. Порядок расчета коэффициента корреляции.
4. Структура уравнения регрессии.
5. Определение значимости коэффициента корреляции.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение технологического процесса изготовления печатных плат фотохимическим методом и исследование основных параметров плат.

Теоретические сведения

Печатным монтажом называется система печатных проводников, обеспечивающих электрические соединения элементов схемы, экранирование, заземление. Элементами ПП являются диэлектрическое основание, металлическое покрытие в виде рисунка печатных проводников и контактных площадок, монтажные и фиксирующие отверстия.

Современный печатный монтаж обеспечивает:
большую плотность монтажных соединений (до 40-50 паек/см²);
резкое уменьшение числа паяных соединений в изделиях, что способствует увеличению надежности изделий;
повышение электрических нагрузок в цепях в 5-10 раз;
улучшение вибропрочности, теплоотдачи и стойкости аппаратуры к климатическим воздействиям;
стабильную повторяемость параметров изделий;
микроминиатюризацию аппаратуры, унификацию и стандартизацию конструкций электронной аппаратуры;
возможность комплексной механизации и автоматизации сборочно-монтажных работ.

Основные технические требования к печатному монтажу:
точность получения изображения рисунка $\pm (0,05 - 0,3)$ мм в зависимости от метода изготовления;
разрешающая способность (0,1 - 1,0) мм,
токонесущая способность проводников до 20 А/мм²;
прочность сцепления с основанием не менее 15 МПа;
сопротивление изоляции между токоведущими элементами не менее 10^4 МОм,
омическое сопротивление проводника шириной 0,5 мм не более 1,4 Ом/м,
сопротивление межслойного перехода не более 0,001 Ом.

Основные материалы для изготовления печатных плат: стеклотекстолит, гибкий фольгированный диэлектрик ФГ, гетинакс, лавсан, фторопласт, поли-

амид фольгированный. Медную фольгу к диэлектрикам приклеивают клеем БФ-4. Выпускают фольгированный гетинакс марок ГФ-1-35, ГФ-2-35, ГФ-1-50, ГФ-2-50, где цифры указывают на число сторон, покрытых фольгой, и толщину фольги. Фольгированный стеклотекстолит СФ-2-50 имеет более высокую механическую прочность, эластичность, высокие электроизоляционные свойства.

Гибкий фольгированный диэлектрик ФГ-1-35 используется для изготовления гибких шлейфов и кабелей. Он выдерживает не менее 300 перегибов с радиусом закручивания 3 мм и углом перегиба 70° . Для микроэлектронных устройств применяют тонкие фольгированные стеклотекстолиты ФДМ, ФДМЭ, ФДМТ толщиной 0,1...0,25 мм.

Методы изготовления печатных плат классифицируют по способам переноса рисунка печатных проводников на диэлектрик и по способам получения токопроводящего покрытия печатного монтажа. Перенос рисунка осуществляют методом трафаретной печати, фотопечати и офсетной печати.

При трафаретной печати резисты, нанесенные через сетчатый трафарет на материал основы, образуют устойчивый к травлению слой толщиной 10...30 мкм. Разрешающая способность метода 0,5 линий/мм, он эффективен при использовании автоматического оборудования для больших серий.

При методе фотопечати поверхность фольгированного диэлектрика покрывают позитивным или негативным светочувствительным материалом, устойчивым к воздействию агрессивных сред и называемым фоторезистом, на который копируют рисунок печатного монтажа. Метод обеспечивает наивысшую разрешающую способность (до 2–3 линий/мм), высокую точность и четкость контуров проводников.

Метод офсетной печати основан на переносе изображения печатной схемы с рельефной формы, покрытой химически стойкой краской, на поверхность платы с помощью резинового валика. Разрешающая способность метода 0,5 - 0,85 линий/мм, он используется только для больших серий ввиду значительных затрат на оборудование.

Получение рисунка печатного монтажа осуществляется либо путем травления фольги с незащищенных мест, либо электрохимическим методом. Методы травления обеспечивают равномерную толщину проводников, высокую прочность сцепления с основанием, высокую электропроводность и простой технологический цикл изготовления платы. Недостатки: значительный расход меди, невозможность металлизации в отверстиях.

Электрохимические методы предполагают первоначальное нанесение на поверхность диэлектрика химическим способом в соответствии с рисунком схемы и последующее гальваническое наращивание металла до требуемой толщины. При этом подвергаются металлизации и монтажные отверстия, экономится медь. Недостатки: слабая адгезия проводников к основанию, неравно-

мерность толщины проводников, значительное время воздействия химических реагентов на основание.

Развитием электрохимических методов являются аддитивные методы, которые позволяют увеличить плотность монтажа, уменьшить подтравливание проводников, сократить расход травильных растворов. Аддитивные методы разделяются на химические, в которых нанесение проводников осуществляется путем селективного химического восстановления ионов металла, и химико-гальванические, в которых наряду с химическим наращиванием производится электрохимическое формирование проводников.

Высокая прочность сцепления проводников с основанием при аддитивном методе достигается использованием либо диэлектрика с введенным катализатором, либо специального адгезива. В качестве катализатора используют палладий, который дисперсно распределяется в материале в количестве от 0,1 до 10%. Адгезивы представляют собой различные композиции, например на основе акрилонитрилбутадиенового сополимера (АБС), толщиной 20...30 мкм, наносимые на изоляционное основание окунанием и последующей термообработкой.

Для изготовления двусторонних печатных плат с металлизацией отверстий применяют комбинированные негативный и позитивный методы, сочетающие в себе принципы химических и электрохимических методов. При **негативном методе** экспонирование рисунка печатного монтажа осуществляется с фотонегатива, травление медной фольги с пробельных мест производится до металлизации отверстий.

Позитивный метод предусматривает экспонирование с фотопозитива. Операция травления осуществляется после металлизации отверстий. Металлическая поверхность проводников и стенки отверстий перед травлением защищаются металлическим резистом, устойчивым к травильным растворам, например сплавом олово - свинец.

При позитивном методе исключаются возможности срыва контактных площадок при сверлении монтажных отверстий, уменьшается воздействие химических реагентов на основание платы, однако происходит пассивация поверхности металла внутри отверстий при травлении фольги.

Комбинированный негативный метод включает следующие операции:

- получение контура заготовки и подготовка ее поверхности;
- нанесение негативного рисунка схемы, ретуширование;
- травление металлической фольги с пробельных мест;
- нанесение защитной плёнки лака для защиты всей поверхности платы от химического меднения краскораспылителем и подсушивание при температуре 50-60 °С (цапон-лак, клей АК-20);

сверление отверстий, зенковка, которая улучшает электрическую связь металлизированного отверстия с контактной площадкой;

химическое меднение;

снятие защитного слоя лака;

гальваническое меднение стенок отверстий;

снятие фоторезиста;

покрытие проводников припоем для обеспечения их паяемости.

Преимущества метода: освоенность процесса производства, широкая номенклатура травителей. Недостатки: возможность срыва контактных площадок при сверлении; требуются специальные контактирующие приспособления при металлизации отверстий; вредное воздействие химических растворов на платы; большая величина подтравливания.

Комбинированный позитивный метод включает операции:

получение контура заготовки и подготовка ее поверхности;

нанесение позитивного рисунка схемы;

нанесение защитного слоя лака (нитроклей АК-20, эмаль ХСЭ, ХСЛ) для предохранения от воздействия химически активных растворов при химической металлизации, количество слоёв 2-3, нанесение окунанием, поливом или с помощью краскораспылителей, сушка в сушильных печах в течение 20-40 мин при 60-80 °С;

сверление отверстий в плате;

химическое меднение отверстий толщиной слоя 1-2 мкм при скорости 20-30 мкм/ч;

гальваническое меднение толщиной 25-30 мкм;

удаление защитного слоя лака;

нанесение металлического резиста для защиты проводников и отверстий от травления (серебрение толщиной 10-12 мкм, гальваническое покрытие сплавами Sn-Pb; Sn-Bi толщиной 20-25 мкм);

удаление фоторезиста;

травление пробельных мест;

оплавление металлического резиста - для удаления припоя из покрытий и улучшения паяемости покрытия;

контроль платы, маркировка.

Гальванически нанесённый металлический резист - сплав Sn-Pb имеет пористую структуру, быстро окисляется, теряет способность к пайке. Для устранения этих недостатков проводят оплавление резиста либо с помощью ИК - излучения, либо в нагретой жидкости (глицерине) или газе. В результате покрытие приобретает структуру металлургического сплава и хорошую паяемость.

Заготовки печатных плат получают резкой листа фольгированного материала на дисковой пиле или штамповкой с одновременной пробивкой техноло-

гических отверстий. При толщине штампуемого листа более 1,5 мм, сложном профиле заготовки обрабатываемый материал подогревают до 60 °С. Заусенцы и фаски снимают на абразивных кругах.

Сверление отверстий в платах осуществляют на одно- и многошпиндельных сверлильных автоматах с цифровым программным управлением при числе оборотов шпинделя 12000-45000 в минуту, подаче 0,02-0,05 мм/оборот.

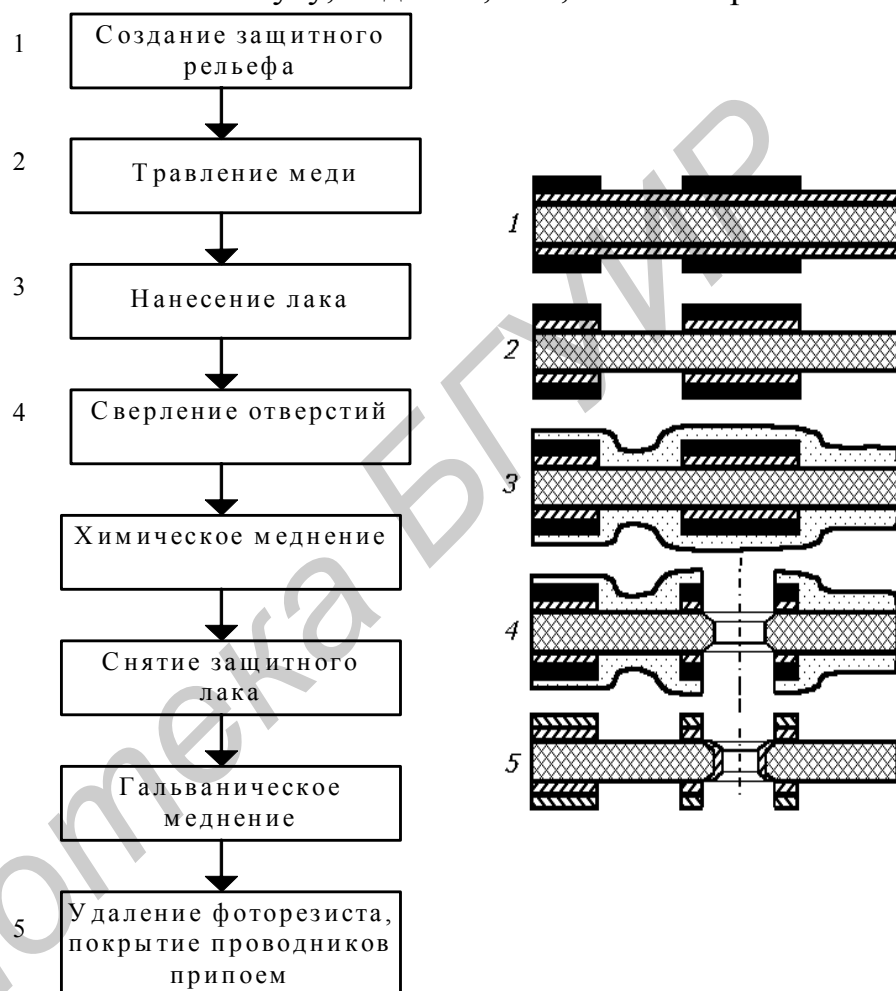


Рис. 3.1. Схема технологического процесса изготовления печатных плат комбинированным негативным методом

Применяют сверла из твердых сплавов типа ВК6М со стойкостью режущей части до 5000 отверстий и оптимальным углом при вершине 120-125°.

Вследствие нагревания сверла отверстия обволакиваются расплавленной эпоксидной смолой, которая может очищаться химическим травлением диэлектрика, при этом не только удаляются остатки смолы, но и подтравливается материал в отверстиях, что увеличивает поверхность для осаждения меди.

Получение изображения защитного рисунка осуществляется с помощью негативных или позитивных фоторезистов. Негативные фоторезисты под действием ультрафиолетового излучения фотополимеризуются и образуют защит-

ные непрозрачные участки на поверхности основания. Негативные фоторезисты изготавливают на основе поливинилового спирта с добавлением к его водному раствору бихромата аммония для придания светочувствительности.

Разрешающая способность негативных фоторезистов - 50 линий/мм, они не содержат токсичных соединений, проявляются теплой водой, имеют низкую стоимость. Недостатками являются эффект темнового дубления, проявляющийся в полимеризации резиста не только под действием света, но и в темноте, а также низкая стойкость к химическим реагентам.

Позитивные фоторезисты, получаемые на основе диасоединений, при действии излучения подвергаются фотохимической деструкции и вымываются при проявлении. Разрешающая способность таких фоторезистов 350–400 линий/мм, в них отсутствует эффект темнового дубления.

Широко применяются сухие фоторезисты типа СПФ, которые по своей разрешающей способности не уступают фоторезистам на основе диасоединений, а по технологичности намного их превосходят, так как исключаются операции сушки, термического дубления, окрашивания.

Сухой фоторезист представляет собой тонкую пленку, состоящую из трех слоев: оптически прозрачной пленки полиэтилентерефталата, пленки светочувствительного полимера, защитной полиэтиленовой пленки. Перед нанесением фоторезиста на поверхность заготовки слой защитной пленки снимают, а фотополимер приклеивают с помощью валковой установки - ламинатора. Оптически прозрачная полиэфирная пленка удаляется перед операцией проявления.

Экспонирование фоторезистов осуществляют в вакуумных светокопировальных рамах, обеспечивающих плотное прилегание фотошаблона к фоторезисту, под воздействием ультрафиолетового излучения (300-450 нм), получаемого от ртутно-паровых или галогенных ламп.

Установка для экспонирования с передвижным источником света КП6341 обеспечивает двустороннее экспонирование и вакуумный прижим заготовок. Охлаждение ламп осуществляют вентилятором либо проточной водой.

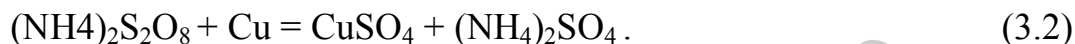
Травление меди - сложный окислительно-восстановительный процесс, в котором окислителем является травильный раствор, переводящий медь из металлического состояния в ионное. В качестве травильных применяют растворы на основе хлорного железа, персульфата аммония, хлорной меди, перекиси водорода и др.

Наиболее распространен раствор хлорного железа (удельный вес 1,3-1,4 г/см³) с небольшим количеством (до 50 г/л) соляной кислоты. Травление меди происходит по реакции



Температура раствора 35-50 °С, время травления фольги толщиной 35 мкм 15-20 мин. Предельная концентрация меди в растворе составляет 50-60 кг/м³, после чего раствор регенерируют. Недостатками состава являются малая скорость травления, потеря меди, трудность отмывки плат.

Травильный раствор на основе персульфата аммония применяется для удаления меди с плат, проводники которых защищены сплавом олово-свинец. Процесс травления описывается уравнением



Температура раствора 45-50 °С, время травления фольги толщиной 35 мкм 10 - 15 мин, предельная концентрация меди в растворе - 40 кг/м³.

Преимущества раствора: более высокая скорость травления, легкость регенерации. Недостатки: наблюдается эффект подтравливания проводников, выпадение кристаллического осадка на вытравленной поверхности, что приводит к дополнительной обработке в 10%-й серной кислоте, токсичность продуктов разложения.

Растворы на основе хлорной меди и перекиси водорода имеют высокую скорость травления, легкость отмывки плат и регенерации растворов, высокие пределы насыщения растворов медью (до 150 кг/м³), низкую стоимость компонентов, однако для стабильной работы требуют постоянной корректировки процентного содержания компонентов.

Травление осуществляют либо погружением заготовок плат в ванны с подогреваемым раствором и перемешиванием его сжатым воздухом, либо на установках струйного травления с автоматизированной подачей раствора и перемещением плат на конвейере со скоростью 0,04 - 0,25 м/мин.

Химическая металлизация поверхности диэлектрика основана на реакции восстановления металла из раствора и его осаждении на поверхности, имеющей каталитические свойства. Для того чтобы передать диэлектрику способность к металлизации, проводят операции сенсibilизации и активирования.

Для достижения требуемой надежности и обеспечения ремонтпригодности толщина металлизации в отверстиях печатных плат должна быть не менее 25 мкм.

Гальваническое меднение осуществляют в пирофосфатных борфтористоводородных и серноокислых блестящих электролитах. Для повышения скорости осаждения применяют перемешивание электролита, проточный электролит, нестационарные режимы электроосаждения.

Наиболее типичные дефекты печатных плат:

короткое замыкание между проводниками и контактными площадками по причине сдвига внутренних слоев при прессовании или попадание раствора химического меднения в зазоры;

разрыв проводников из-за глубокой царапины на поверхности до обработки, подтравливания, внутренних механических напряжений в МПП;

отсутствие контакта между проводниками слоев и металлизированными отводами вследствие плохой подготовки к химической металлизации или малой площади контактирования;

выход окружности отверстия за пределы контактной площадки по причине плохой точности при сверлении отверстий;

расслоение из-за некачественного компаунда, невыдержанного режима прессования;

понижение сопротивления изоляции - проникновение в межслойные соединения влаги, растворов, плохое совмещения слоев.

Контроль качества плат производят после основных операций технологического процесса, что обеспечивает обнаружение и устранение причин брака.

Типичными причинами брака могут быть: непрочное прилегание фоторезиста к плате, малое время экспонирования, плохая подготовка поверхности, подтравливание печатных проводников. Готовую плату проверяют визуально. Печатные проводники должны быть четкими, с ровными краями, без отслаиваний и подтравливания. Электрические и механические параметры печатных проводников исследуют с помощью специальных тестовых плат, имеющих контрольные элементы (рис. 3.2).

Порядок выполнения работы

1. Получить необходимые материалы и инструмент. Вырезать заготовку из фольгированного материала по размерам фотошаблона на специальном станке.

2. Зачистить шлифовальной шкуркой поверхность заготовки, снять заусенцы с помощью напильника.

3. Обезжирить поверхность заготовки с помощью салфетки, смоченной ацетоном. **Работу производить под вытяжным шкафом.**

4. Декапировать плату в растворе соляной кислоты, налитом в ванночку из органического стекла, в течение 2 мин. Раствор слить обратно в сосуд.

5. Промыть плату в проточной воде.

6. Высушить и прогреть плату до температуры 50-60⁰С под феном.

7. Снять защитную пленку с одной стороны сухого фоторезиста и наложить его этой стороной на нагретую плату.

8. Прикатать фоторезист к поверхности медной фольги с помощью валика, начиная с центра платы к ее краям, прижимая валик сначала с небольшим усилием, затем более сильно.

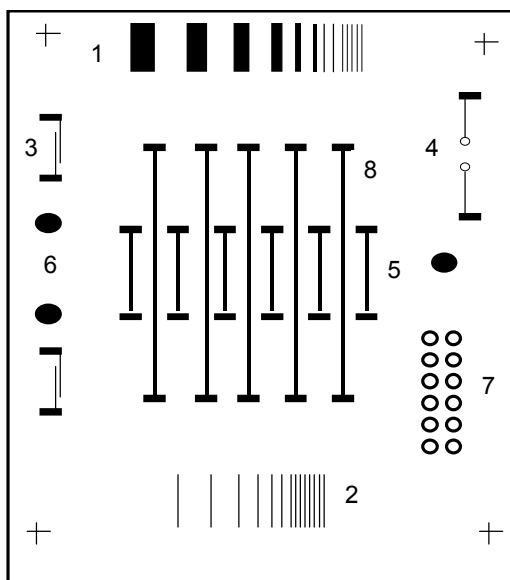


Рис. 3.2 Тестовая печатная плата с контрольными элементами для определения следующих параметров:

- 1 - минимальная ширина проводника; 2 - минимальное расстояние между проводниками; 3 - сопротивление изоляции поверхностное; 4 - сопротивление изоляции объемное; 5 - токонесущая способность проводников;
- 6 - прочность сцепления с основанием; 7 - качество металлизации; 8 - удельное электрическое сопротивление

9. Ознакомьтесь с устройством и правилами работы на установке экспонирования по инструкции. Под наблюдением преподавателя или инженера включить установку. Для этого:

включить рубильник на передней стенке установки; тумблеры "Сеть" и "Вентиляторы" на пульте управления; тумблер "Лампы" (только левый) и прогреть лампу в течение 3-4 мин;

откачать воздух из вакуумного резервуара установки, включив тумблер "Вакуумный насос". Степень разряжения контролировать по прибору и не поднимать его уровень выше 0,8 торр.

10. Совместить фотошаблон с печатной платой и поместить в загрузочную рамку (левую). При совмещении фотошаблона и платы обратить внимание на то, чтобы все надписи на фотошаблоне правильно читались, т.е. не были зеркально перевернутыми.

11. Прижать верхнюю часть рамки к нижней двумя руками и удерживать ее в этом положении до полной откачки воздуха

12. В течение всего времени экспонирования поддерживать уровень разряжения в рамке в пределах 0,6-0,8 торр, путем периодического включения и выключения тумблера "Вакуумный насос".

13. Совместить вручную излучение лампы с печатной платой и экспонировать 7-9 мин.

14. Во время экспонирования через 1-1,5 мин смещать лампу на 1-5 см относительно прежнего положения в одну или другую сторону, добиваясь при этом равномерной засветки фоторезиста.

15. Выключить тумблер "Лампы" и отвести лампу в исходное положение.

16. Выключить тумблер "Вакуумный насос".

17. Открыть верхнюю часть рамки, для чего, придерживая одной рукой рамку, нажать кнопку "Рамка".

18. Убрать разряжение в вакуумном резервуаре путем нажатия контакта в правом ближнем углу загрузочной рамки.

19. Через 3-4 мин после выключения лампы выключить тумблеры "Вентиляторы", "Сеть".

20. Выключить рубильник на передней стенке установки.

21. После остывания платы снять вторую защитную пленку с фоторезиста.

22. Проявить фоторезист. Для этого: небольшое количество проявителя (50-100 мл) налить в ванночку; опустить в ванночку плату и легким протирающим смоченной салфеткой всей поверхности фоторезиста проявить его.

Проявление производить в вытяжном шкафу. Отработанный раствор слить.

23. Произвести необходимые измерения с помощью микроскопа МБС-2.

24. Протравить пробельные места медной фольги в растворе треххлористого железа. Для этого:

налить в керамическую ванночку травильный раствор;

поместить плату в раствор так, чтобы она была полностью закрыта раствором;

включить плитку и нагреть раствор до 60°C ;

после травления слить раствор обратно в сосуд, вымыть ванночку, промыть плату в проточной воде.

25. Снять фоторезист. Для этого:

налить в ванночку раствор снимателя;

смоченной салфеткой протирать плату до полного снятия фоторезиста.

26. Промыть и высушить плату.

27. Включить установку контроля печатных плат КПП-1:

сетевой переключатель перевести в положение 1 и прогреть установку в течение 3-5 мин;

закрепить исследуемую плату держателями;

после появления проводников на экране дисплея настроить четкость изображения, передвигая вверх и вниз видеокамеру с помощью регулировочного винта;

передвигая исследуемую плату по вертикальной и горизонтальным осям, определить качество проводников на печатной плате (их целостность, от-

слоение и подтравливание), а также измерить геометрические размеры проводников;

выключить установку, переведя переключатель в позицию 0.

28. Произвести измерения минимальной ширины проводника 1, минимального расстояния между проводниками 2 и диаметра контактной площадки 6 с помощью микроскопа МБС-2 (см. рис. 3.2). Измерения производить на фототаблоне и изготавливаемой плате после процессов экспонирования и травления, полученные данные занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1
Параметры печатных проводников на различных стадиях технологического процесса

Операции	Минимальная ширина проводника, мм	Минимальные промежутки, мм	Диаметр контактной площадки, мм	Причины отклонений от номинальных значений
Фотонегатив				
Получение защитного рисунка				
Травление				
Химическая металлизация				
Гальваническая металлизация				

29. Измерить сопротивление изоляции между проводниками 3 и 4. Для этого:

собрать схему (рис. 3.3);

установить измерительные щупы на контактные площадки исследуемых проводников;

включить прибор Е7-14, для чего сетевой переключатель перевести в положение "Вкл.";

после установки прибора в рабочий режим нажать на его передней панели кнопки: «R», «Усреднение 10» и автоматический предел измерения;

запустить прибор нажатием кнопки "Запуск" в автоматическом либо ручном режиме;

полученные значения сопротивления занести в табл. 3.2.

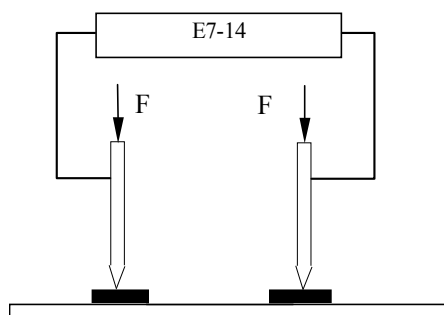


Рис. 3.3 Схема измерения сопротивления изоляции между проводниками

Таблица 3.2

Электрические и механические параметры печатных проводников

Исследуемые параметры	Ширина проводника b , мм					Примечание
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
1. Электрическое сопротивление, Ом/м						
2. Токонесущая способность, А/мм ²						
3. Сопротивление изоляции, МОм						
4. Прочность сцепления с основанием, Па						
5. Количество перепаек						

30. Измерить удельное электрическое сопротивление проводников. Для этого:

собрать схему (рис. 3.4);

включить вольтметр путем перевода сетевого переключателя в положение "Вкл";

на лицевой панели вольтметра нажать кнопки "АВП", "U" и T_0 ;

измерительный щуп установить на контактные площадки проводника 8

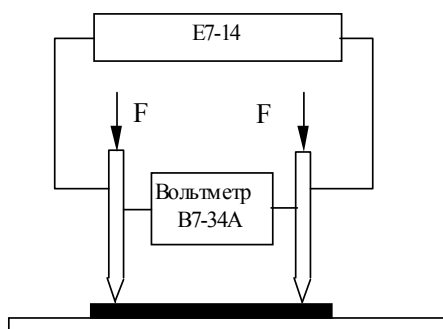


Рис. 3.4 Схема измерения удельного электрического сопротивления

наибольшей ширины (см. рис. 3.2.);

вывести ручку регулировки напряжения выпрямителя в крайнее левое положение;

включить выпрямитель путем установки ручки "Режим работы" в положение 1;

вращая ручку регулировки напряжения выпрямителя вправо, выставить ток 5 - 7 А;

измерить величину падения напряжения на проводнике с помощью вольтметра;

выключить выпрямитель и переставить измерительные щупы на контактные площадки следующего проводника.

В случае изменения величины тока не пытаться выставить его первоначальное значение, а переписать установившееся. Повторить измерения для оставшихся проводников. **Внимание!** В процессе измерений следить, чтобы на передней панели вольтметра была включена кнопка "U";

рассчитать удельное электрическое сопротивление проводников по формуле

$$\rho = R \cdot S / L, \quad (3.3)$$

где R - электрическое сопротивление, рассчитанное по закону Ома; S - площадь сечения проводника; L-длина проводника.

31. Определить токонесущую способность проводников. Для этого:

из схемы (рис. 3.4) исключить вольтметр;

измерительные щупы установить на контактные площадки проводника 5 с наибольшей шириной (см. рис. 3.2);

вывести ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение;

включить выпрямитель ручкой "Режим работы" в положение 1;

поворачивая ручку регулировки напряжения вправо, заметить на амперметре значение тока, при котором произойдет выгорание проводника;

вывести ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение;

выключить выпрямитель и переставить измерительные штанги приспособления на контактные площадки следующего проводника;

повторить измерения для оставшихся проводников и полученные данные занести в табл. 3.2.

32. Определить количество перепаек. Для этого:

включить тумблер "Сеть" на источнике питания паяльника;

после нагрева паяльника залудить несколько контактных площадок 7 и, имитируя процесс пайки, определить количество перепаек до отслоения контактной площадки от основания.

33. Определить усилие отрыва. Для этого:

залудить контактную площадку б и припаять к ней специальное приспособление;

с помощью разрывной машины оторвать контактную площадку от основания, зафиксировав при этом величину усилия отрыва.

34. Убрать расходные материалы со столика в вытяжном шкафу, вымыть ванночки, аккуратно составить сосуды с химреактивами. Сдать рабочие места, инструмент и оставшиеся материалы дежурному.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема технологического процесса, исследуемого в работе, с эскизами по операциям.
3. Чертеж тестовой печатной платы.
4. Результаты исследований (табл. 3.1, 3.2).
5. Расчеты ρ_m , $I_{доп}$, σ_v .
6. Графики зависимостей $R = f(b)$; $I = f(b)$; $R_{изол} = f(a)$.
7. Выводы, содержащие анализ экспериментальных данных.

Контрольные вопросы

1. Основные материалы в производстве печатных плат.
2. Какие существуют методы изготовления односторонних плат?
3. Чем различаются негативный и позитивный комбинированные методы?
4. Какие типы фоторезистов используются в производстве печатных плат?
5. Сравните эффективность травителей.
6. Методы контроля параметров печатных проводников.

Лабораторная работа N 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СКЛЕИВАНИЕМ

Цель работы

Исследование влияния технологических факторов (температуры, давления, времени сушки) на механическую прочность клеевых соединений, а также моделирование процесса склеивания методом планирования эксперимента.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Склеивание - это технологический процесс соединения изделий, осуществляемый с помощью специальных веществ, которые вследствие взаимодействия с поверхностью изделий и изменения своего физического состояния способны при определенных условиях прочно их скреплять. Соединение различных материалов с помощью клеев является результатом проявления сил адгезии, аутогезии и когезии.

Адгезией называется явление прилипания, которое возникает при контакте двух разнородных материалов. Процесс склеивания сопровождается не только возникновением специфических сил сцепления между клеем (адгезивом) и склеиваемой поверхностью (субстратом), но также проникновением адгезива в поры склеиваемого материала и удержанием в них затвердевшего адгезива благодаря механическому заклиниванию.

Аутогезией называется явление прилипания поверхностей однородных материалов (самослипание). Это явление наблюдается при соединении резин, термопластов.

Когезия - это явление сцепления молекул склеивающего вещества между собой в объеме тела. В тонкой пленке клея наблюдается образование прочных молекулярных цепей от границы раздела фаз в глубь полимера. Для прочности клеевого соединения важно, чтобы эта структура не имела пор.

Основным явлением при склеивании является адгезия, которая возникает в результате проявления сил молекулярного взаимодействия между клеем и соединяемой поверхностью. Согласно современной классификации, связи подразделяются на два основных класса: физические связи, которые проявляются при сближении двух веществ до расстояния межмолекулярного взаимодействия, и химические, возникающие в результате перестройки электронных оболочек атомов при их сближении.

Физические (ван-дер-ваальсовы) связи разделяются на три типа: полярные, индукционные, дисперсионные. Наибольшая энергия соответствует полярным

силам, а наименьшая - индукционным.

Мерой полярности молекул служит дипольный момент μ , равный произведению величины зарядов q на расстояние между их центрами r ($\mu = rq$). Индукционные силы возникают в результате взаимодействия молекул, имеющих постоянный диполь, с неполярными молекулами, способными поляризоваться под действием постоянного диполя.

Дисперсионное взаимодействие свойственно всем молекулам: полярным, неполярным и их комбинациям - и обусловлено тем, что при вращении электронов вокруг ядра в отдельные мгновения создаются такие положения, при которых центры тяжести положительных и отрицательных зарядов смещаются относительно среднего положения. При этом даже у неполярных молекул образуются мгновенные диполи, которые вызывают их притяжение друг к другу.

Химические связи также делятся на три типа: ионные, ковалентные, металлические. При образовании ионной связи один из взаимодействующих атомов передает другому один или несколько валентных электронов, в результате чего атомы превращаются в ионы, а ионы, притягиваясь друг к другу вследствие противоположного знака их заряда, образуют молекулу с типичной ионной связью. Обычно такими атомами-донорами являются атомы металлов с эллиптическими орбитами электронов.

Ковалентные (атомные) связи образуются путем передачи каждым из взаимодействующих атомов одного или нескольких электронов в так называемое совместное пользование. Из них образуется электронная пара (или пары), общая для обоих атомов, посредством которой и осуществляется атомная связь между ними.

Металлическая связь имеет особенности ионной и атомной связей. Атомы удерживаются в решетке так же, как и при ионной связи, но силы притяжения-отталкивания возникают в результате действия электронного облака. Этот тип связей характерен для металлов.

Анализ возникающих при склеивании материалов связей показывает, что наиболее прочными из рассмотренных выше являются химические связи, так как у них значительно превосходящие межмолекулярные силы.

Существует несколько теорий, в основе которых лежит различное представление о природе сил взаимодействия и механизме образования адгезионного соединения.

Адсорбционная теория объясняет адгезию действием сил Ван-дер-Ваальса между поверхностными молекулами адгезива и субстрата. Процесс образования клевого соединения протекает в две стадии. На первой стадии в результате микроброуновского движения происходит миграция больших молекул полимера из раствора или расплава к поверхности субстрата. Это приводит к накоплению

ванию молекул клеящего вещества у поверхности субстрата, т.е. к увеличению концентрации раствора клея у поверхности и снижению содержания полимера в остальном объеме раствора. Перемещение молекул адгезива интенсифицируется давлением и нагревом. Вследствие такого перемещения уменьшается расстояние между активными группами адгезива и субстрата.

Второй стадией адгезии является адсорбция. Когда расстояние между молекулами клея и субстрата станет меньше 5 Å, начинают действовать межмолекулярные силы, приводящие к образованию различных связей (диполь - диполь, диполь - наведенный диполь). Связи между молекулами адгезива и субстрата оказываются более прочными, чем взаимодействие молекул полимера с молекулами растворителя клея. Это еще более усиливает миграцию цепей полимера к субстрату, в результате чего возникает большое количество точек контакта (якорные точки). Прочность адгезионного соединения зависит от природы межмолекулярных сил и от количества якорных точек между адгезивом и субстратом. Величину работы адгезии можно определить несколькими методами. Метод краевого угла основан на смачиваемости твердых поверхностей. В том случае, когда капля жидкости находится на поверхности металла, справедливо уравнение Дюпре:

$$W_{т.жс} = \sigma_{т.г} + \sigma_{жс.г} + \sigma_{т.жс}, \quad (4.1)$$

где $W_{т.жс}$ - работа адгезии между твердым телом и жидкостью; $\sigma_{т.г}$ - поверхностное натяжение на границе твердое тело в газе; $\sigma_{жс.г}$ - поверхностное натяжение на границе жидкость - газ; $\sigma_{т.жс}$ - поверхностное натяжение твердого тела на границе с жидкостью (рис. 4.1).

Соотношение между $\sigma_{т.г}$, $\sigma_{жс.г}$, $\sigma_{т.жс}$ и Θ можно получить, если рассмотреть проекцию их на горизонтальную плоскость (поверхность твердого тела):

$$\sigma_{т.г} = \sigma_{т.жс} \cos \Theta. \quad (4.2)$$

Подставив данное выражение в уравнение (4.1), получим

$$W_{т.жс} = \sigma_{т.г} (1 + \cos \Theta). \quad (4.3)$$

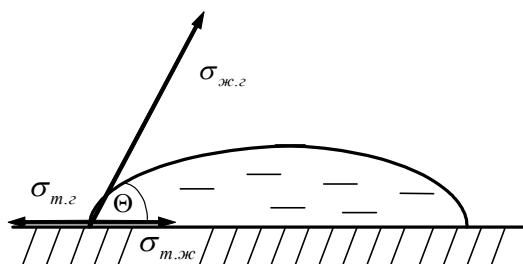


Рис. 4.1 Растекание капли жидкости по твердой поверхности

Из уравнения (4.3) следует, что максимальная работа адгезии будет получена тогда, когда $\cos\Theta = 1$, т.е. когда угол смачивания $\Theta \rightarrow 0^0$. В этом случае жидкость смачивает полностью поверхность твердого тела и величина адгезии будет определяться когезионной прочностью жидкости, равной $2\sigma_{ж.г}$. Этот факт часто используется в практике склеивания металлов при подготовке поверхности. Если угол смачивания будет 90^0 , то величина работы адгезии будет равна половине величины работы когезии. При $\Theta=180^0$ работа адгезии равна 0.

Работа адгезии может определяться и в неравновесном состоянии по величине усилия отрыва:

$$w_0 = \frac{P}{b}(1 - \cos\alpha), \quad (4.4)$$

где P - усилие при отрыве; b - ширина образца; α - угол, под которым пленка отрывается от пластины.

Результаты испытаний клеевых соединений первым и вторым методами показали, что работа адгезии, полученная методом краевого угла, значительно отличается от величины работы адгезии в неравновесных условиях. Это говорит о том, что на величину адгезии оказывают влияние не только межмолекулярные силы взаимодействия, но и электростатические. В этом состоит сущность одной из слабых сторон адсорбционной теории.

Диффузионная теория исходит из цепного строения и подвижности гибких макромолекул, обуславливающих диффузию полимеров в пограничном слое. Продиффундировавшие части макромолекулы удерживаются в полимерах межмолекулярными силами. Прочность образуемого адгезионного соединения пропорциональна числу молекулярных цепей, пересекающих границу раздела, и глубине проникновения макромолекул. Если концевые участки макромолекул проникают в другой полимер на глубину, соответствующую длине цепочки макромолекулы, образованной из 200-600 молекул мономера, то при разрушении адгезионной связи происходит скольжение цепей, т.е. концы макромолекул одного полимера выдергиваются из другого. Следовательно, энергия затрачивается на преодоление межмолекулярного взаимодействия, установившегося между продиффундировавшими участками двух полимеров. Если же продиффундировавшие участки полимера длиннее, то при разрушении контакта происходит разрыв макромолекулы по химическим связям. Глубина проникновения макромолекул одного полимера в другой зависит от времени контакта, внешних условий, химической природы полимеров и их физического состояния. Взаимная диффузия двух приведенных в контакт полимеров возможна при условии их взаиморастворимости и достаточной подвижности молекул. Взаиморастворимость определяется в основном соотношением полярностей. Высокая адгезия возможна только тогда, когда оба высокополимера либо полярны, либо неполярны, и затруднена в том случае, когда один полимер полярен, а другой неполярен.

При адгезии к пористым телам, а также при адсорбционном механизме образования адгезионной связи можно также наблюдать возрастание адгезии при увеличении длительности контакта. При выяснении влияния на адгезию давления было установлено, что когда в контакт с субстратом приводится твердый адгезив, повышение давления способствует более полному взаимодействию склеиваемых слоев вследствие упругих сил или пластических деформаций неровностей поверхности и адгезия возрастает. Если же адгезив наносится на поверхность субстрата из раствора, то повышение давления при склеивании не оказывает никакого влияния на адгезионную прочность, так как в этом случае полный контакт между поверхностями обоих полимеров устанавливается и без давления.

С увеличением температуры контакт адгезива повышается. Это следствие увеличения теплового движения молекул. Адгезия практически не зависит от толщины слоя адгезива, если он обладает высокой эластичностью. Если же адгезив неэластичен, прочность склеивания уменьшается с возрастанием толщины слоя адгезива. Это объясняется возникновением тангенциальных упругих напряжений в слое адгезива вследствие усадки при высыхании клея.

На адгезию высокополимеров очень сильно влияют природа адгезива и субстрата, такие свойства их молекул, которые определяют взаиморастворимость и диффузионную способность (молекулярный вес, форма, строение, гибкость молекул, присутствие в них полярных групп и т.д.). Диффузионная теория объясняет влияние на адгезию ряда технологических факторов: применение при склеивании растворителя, общего для адгезива и субстрата, введение в адгезив пластификатора или наполнителя, освежение перед склеиванием поверхностей растворителями и т.д. При склеивании двух высокополимеров целесообразно применять растворитель, способный растворять оба полимера, так как этим обеспечивается взаимная диффузия молекул адгезива и субстрата, что обуславливает их наибольшее взаимопроникновение и наибольшую адгезию.

Введение пластификатора в высоковязкий адгезив, тепловое движение молекулярных цепей которого затруднено, может способствовать диффузии, следовательно, повышать адгезию и прочность склеивания. При этом количество пластификатора должно быть небольшим, так как иначе прочность склеивания падает из-за снижения механических свойств клеящего вещества.

Однако диффузионная теория адгезии не дает полного представления о механизме образования связи адгезив - субстрат в случае склеивания металлов. Как известно, металлы имеют кристаллическую решетку, расстояние между ионами которой мало по сравнению с поперечным сечением цепей полимерных клеев и их длиной. Кроме того, площадь поверхностных дефектов, микротрещин и дефектов кристаллической решетки занимает лишь небольшую часть склеиваемой поверхности металла. Следовательно, роль диффузии и возник-

кающей вследствие этого адгезии будет незначительна. Отсюда видно, что диффузионная теория адгезии объясняет лишь некоторые явления склеивания высокополимерных материалов термопластичными клеями.

Электрическая теория систему адгезив - субстрат отождествляет с конденсатором, обкладками которого является двойной электрический слой, возникающий в зоне контакта двух разнородных полимеров. Механизм образования двойного электрического слоя объясняется следующим. В общем случае двойной слой образуется благодаря переходу заряженных частиц (электронов) из одной фазы в другую (донорно-акцепторное взаимодействие). При контакте аморфных тел двойной слой может возникнуть, если одна из поверхностей насыщена донорными, а другая - акцепторными группами.

Подтверждением этой теории адгезии могут служить следующие экспериментальные данные: зависимость работы адгезии от скорости отслаивания, повышение сопротивления отслаивания в вакууме вследствие более высокого потенциала разряда; изменение работы адгезии при замене газовой среды, в которой производилось отслаивание и др.

Электрическая теория адгезии также не имеет универсального характера, она не может объяснить, например, возрастания адгезии с приближением природы соединяемых высокополимеров друг к другу. Неполлярные полимеры не могут образовать прочную связь. Из электрической теории следует, что они не способны быть донорами электронов и, следовательно, не могут образовать двойной электрический слой.

Ни одна из рассмотренных существующих теорий адгезии не может исчерпывающе объяснить возникновение прочной связи между различными адгезивами и субстратами. Поэтому для объяснения явлений адгезии при склеивании необходимо использовать сочетание этих теорий.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СКЛЕИВАНИЯ

1. Подготовка склеиваемых поверхностей.

Для получения высококачественных клеевых соединений необходимо со склеиваемых поверхностей удалить загрязнения, обезжирить их в трихлорэтилене или в этиловом спирте, промыть горячей водой и высушить.

2. Подготовка клея к применению.

Клей должен обладать хорошей текучестью и способностью смачивать склеиваемую поверхность, чтобы обеспечить наибольшую поверхность контакта. Для придания клею необходимой вязкости его можно разжижать растворителем, состав которого обусловлен маркой клея.

3. Нанесение клея на склеиваемые поверхности.

Клей наносится на склеиваемые поверхности в основном кистью или пульверизатором, а также окунанием детали в жидкий клей. Обычно используется

двойное нанесение слоя клея, иногда бывает и многократное. Количество клея в клеевых соединениях может быть разное, обычно толщина клеевого шва находится в пределах от 0,07 до 0,25 мм. Во многих случаях может быть увеличена толщина клеевого шва. Но во всех случаях, когда желательно получить от соединения оптимальные механические характеристики, клеевые швы не должны превышать по толщине 0,6 мм.

4. Подсушивание нанесенного клея перед соединением деталей.

Если растворитель остается в клеевом слое во время сборки склеиваемых частей, он может привести к образованию соединения с недостаточной прочностью. Поэтому для удаления растворителя необходимо подсушить склеиваемые детали. Сушка обычно производится короткое время и на воздухе.

5. Соединение склеиваемых деталей и отверждение клея.

Для различных типов клеев на отверждение по-разному влияют температура, давление и время процесса склеивания. Применяемые методы нагрева и давления весьма разнообразны. Самые удобные источники тепла - камеры или печи, нагреваемые электричеством и газом. Внешнее давление осуществляется обычно прессами, струбцинами, зажимами, в некоторых случаях, при особо сложных деталях, процесс отверждения осуществляется в вакууме.

6. Зачистка клеевых соединений.

Если внешний вид изделия или другие требования обязывают обеспечить отсутствие на готовом изделии клея, необходимо счищать этот избыток до отверждения клея. Основными методами очистки являются механическое соскабливание, обдувка песком и замачивание в горячих щелочных растворах мест с отвердевшим клеем. Для сохранения клеевых соединений чистыми особенно эффективны предупредительные меры. Для этого на поверхность изделия, прилегающую к склеиваемым участкам, наносится слой защитной пленки.

7. Контроль качества склеивания.

Осуществляется следующими методами: визуальным осмотром изделий; проверкой формы и размеров клеевого шва; простукиванием; с помощью специальных приборов (метод свободных колебаний, метод сквозного прозвучивания, ультразвуковой резонансный метод); испытаниями образцов; испытаниями на разрушение готовых изделий в определенном проценте от партии; проведением статических или динамических испытаний готовых изделий в определенном проценте от партии по специальной методике. Последние три метода испытаний дают возможность определить качество склеивания в зависимости от внешних факторов. При деформации многослойной системы материалов наблюдаются четыре типа разрушений (рис. 4.2):

адгезионный - полное отслаивание адгезива от субстрата;

аутогезионный - разрушение происходит по месту слипания склеиваемых поверхностей;

когезионный - разрушение одного из склеиваемых материалов или самой клеевой пленки;

смешанный - характеризуется частичным расслаиванием по месту первоначального контакта или частичным разрушением адгезива или субстрата.

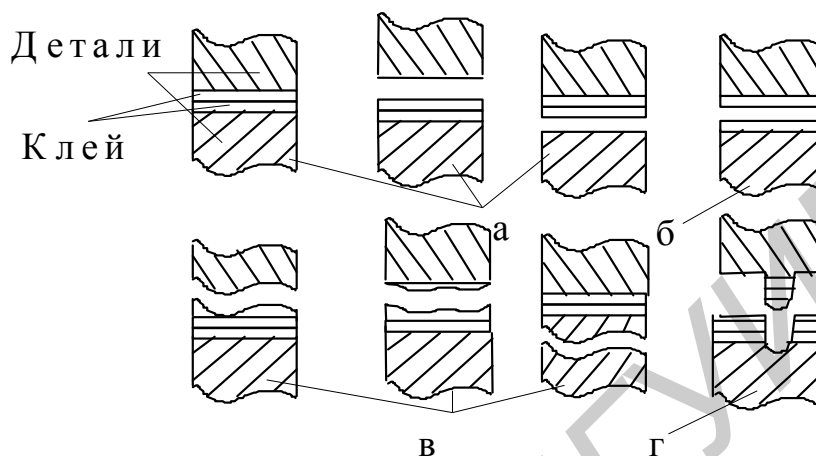


Рис. 4.2. Типы разрушений:

а - адгезионный; б - аутогезионный; в - когезионный; г – смешанный

Для получения качественного и прочного клеевого соединения необходимо, чтобы клей отвечал тем высоким требованиям, которые предъявляются к нему. Подбор клеящего материала в этом случае является ответственной и важной задачей. Технические требования, предъявляемые к клеящему материалу, разнообразны. Клей, применяемый в радиоэлектронной промышленности, должен обладать:

- 1) удовлетворительными электроизоляционными свойствами;
- 2) хорошей адгезией к большому ассортименту деталей из различных материалов;
- 3) достаточной вибропрочностью, вязкостью, позволяющей наносить его на вертикальные поверхности;
- 4) жизнеспособностью и быстрой отверждаемостью при нормальных условиях ($20-30^{\circ}\text{C}$); способностью выдерживать температуру паяльника, равную 250°C , в течение нескольких секунд;
- 5) свойством не вызывать коррозии и длительное время находиться в реальных эксплуатационных и атмосферных условиях.

По типу связующих материалов эти клеи подразделяются на:

- а) термореактивные (БФ-2, БФ-4, БФ-6, ПУ-2, эпоксидные Д9, ЭКС-4, ВК-9);
- б) термопластичные (полиметакриловый ПМП, полистироловый ПС);
- в) эластомеры (88НП, ЛН, КТ-15);

г) клеи животного происхождения (казеиновый).

Свойства некоторых типов клеев и области их применения даны в табл 4.1.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СКЛЕИВАНИЯ

При исследовании технологических процессов с целью получения аналитических моделей и последующей их оптимизации стремятся проводить опыты таким образом, чтобы при их минимальном количестве получить исчерпывающую информацию об объекте исследования. Эту задачу можно решить, используя математическую теорию планирования эксперимента, которая позволяет представлять информацию в краткой, стандартной и удобной форме. Одним из самых распространенных методов, применяемых для этих целей, является метод полного факторного эксперимента (ПФЭ), который приводит к нахождению математической модели технологического процесса в виде полинома первой степени с учетом парных взаимодействий:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j, \quad (4.5)$$

где y - выходной параметр; b_i, b_{ij} - коэффициенты уравнения регрессии; x_i, x_{ij} - независимые переменные.

В качестве выходного параметра при склеивании целесообразно выбрать предел прочности при равномерном отрыве σ_g или предел прочности на срез $\sigma_{ср}$ (Па). Независимыми переменными являются технологические режимы склеивания - температура сушки, время сушки, удельное давление. Остальные режимы - подготовка поверхности, нанесение слоя клеевого грунта и его сушка - должны в данном исследовании быть одинаковыми для всех образцов.

Для упрощения записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных пользуются не натуральными значениями независимых переменных (факторов), а кодированными, причем кодирование производят так, чтобы верхний уровень соответствовал "+1", нижний - "-1", а основной - нулю. Для факторов с непрерывной областью определения это всегда можно сделать с помощью преобразования

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i + \tilde{x}_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (4.6)$$

где \tilde{x}_i - натуральное значение фактора; \tilde{x}_{i0} - натуральное значение основного уровня фактора; Δx_i - интервал варьирования.

Условия факторного эксперимента обычно записывают в виде таблицы, называемой матрицей планирования, в которую вносятся кодовые значения факторов (+1 и -1), а план эксперимента строится путем перебора всех комбинаций уровней. Для случая двух независимых переменных матрица планирования приведена в табл. 4.2.

Типы клеев и их характеристики

Марка клея	Состав	Интервал рабочих температур, °С	Режим склеивания	Предел прочности, МПа	Удельное объемное сопротивление, Ом/см	Электрическая прочность, кВ/см	Область применения
БФ	Фенолформальдегидная смола, поливинилбутиральный, спирт	-60...+85	120 °С, 1-2 ч, 0,1-0,5 МПа	10-11	$2 \cdot 10^{10}$	--	Универсальное приклеивание ферритовых сердечников. Закрепление изоляции проводов
ВК-32-200	Фенолформальдегидная смола, каучук, лак бакелитовый	-60...+200	190 °С, 1 ч, 0,6 МПа	8-20	$4 \cdot 10^{10}$	64	Крепление интегральных схем к основаниям и корпусам
ВК-9	Эпоксидная смола, полиамидная смола, полиэтиленполиамин, карбонильное железо, алюминиевая пудра	-60...+200	60 °С, 1 ч, 0,2 МПа	36-38	$2 \cdot 10^{10}$	20	Крепление ЭРЭ к металлу, гетинаксу, стеклотекстолиту. Склеивание разрезных магнитопроводов, сердечников магнитных головок
Д-9	Эпоксидная смола, дибутилфталат, кварц молотый, полиэтиленполиамин	-60...+85	20°С, 24 ч, 0,2МПа	23-24	10^{14}	16	Крепление ЭРЭ
88НП	Бутилфенолформальдегидная смола, наирит, бензин	-60...+70	20 °С, 12 ч, 0,1МПа	1-2	$3 \cdot 10^{14}$	54	Приклеивание прокладок из резины, кожи, ткани, войлока, пробки к металлу, стеклу, древесине

Матрица планирования (ПФЭ)

Условия эксперимента				Факторы			у _{ср} , Н	S2(y)
				t, с (x1)		p, МПа (x2)		
Основной уровень, x0								
Интервал варьирования, Δxi								
Верхний уровень (+1)								
Нижний уровень (-1)								
№ опыта	x0	x1	x2	Параметр оптим. yi, Н			у _{ср} , Н	S2(y)
				1	2	3		
1	+	+	+					
2	+	-	+					
3	+	+	-					
4	+	-	-					

После реализации ПФЭ, используя метод наименьших квадратов, определяют коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_0 \tilde{y}_i}{N}; \quad (4.7)$$

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \tilde{y}_i}{N}; \quad (4.8)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i x_j \tilde{y}_i}{N}. \quad (4.9)$$

В связи с ограниченным объемом экспериментальных данных при планировании эксперимента проверяют значимость найденных коэффициентов уравнения регрессии, используя критерий Стьюдента t_c :

$$t_c = \frac{|b_i|}{s \{b_i\}}; \quad (4.10)$$

$$s^2 \{b_i\} = \frac{s^2 \{\tilde{y}\}}{N}; \quad (4.11)$$

$$s^2\{\tilde{y}\} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \tilde{y}_i)^2}{N(m-1)}, \quad (4.12)$$

где $s^2\{\tilde{y}\}$ - дисперсия воспроизводимости; $s^2\{b_i\}$ - дисперсия коэффициентов уравнения регрессии; \tilde{y}_i - среднее значение выходного параметра из m параллельных опытов.

Если вычисленная величина t_c превышает табулированное критическое значение t_{ck} (табл. 2 приложения) для выбранного уровня значимости (обычно 0,05) и числа степеней свободы $f = N(m-1)$, то коэффициент "b" признается значимым. В противном случае коэффициент "b" считается статистически незначимым и соответствующий член исключается из уравнения регрессии без пересчета остальных. Можно также проводить расчет доверительного интервала и сравнивать его с коэффициентом регрессии:

$$a_i > \Delta b_i \pm t_{ck} S\{b_i\}. \quad (4.13)$$

Полученное уравнение регрессии должно адекватно описывать изучаемый технологический процесс. Проверка гипотезы адекватности проводится с помощью критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S^2_{ocm}}{S^2\{\tilde{y}\}}, \quad (4.14)$$

$$S^2_{ocm} = \frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - \bar{y})^2}{N-\alpha}, \quad (4.15)$$

где S^2_{ocm} - остаточная дисперсия, обусловленная как ошибкой эксперимента, так и действием изучаемых факторов; \hat{y}_i - величина выходного параметра, рассчитанная по найденному уравнению регрессии; α - число значимых членов в уравнении регрессии.

Уравнение признается адекватным при выполнении условия $f_p < f_{kp}$, определенного по табл. 3 (приложения) для выбранного уровня значимости (обычно 0,01) и числа степеней свободы $f_1 = N - \alpha$ и $f_2 = N(m-1)$. При получении неадекватной модели необходимо сузить интервалы варьирования независимых переменных, центр эксперимента перенести в условия наилучшего опыта первой серии и реализовать новую серию опытов.

Получение адекватной модели позволяет перейти к ее оптимизации. В случае линейного уравнения регрессии это достигается логическим рассуждением. Оптимальные значения выходных параметров лежат на границах интервалов варьирования.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить описание лабораторной работы.
2. Подготовить по указанию преподавателя склеиваемые образцы (рис. 4.3) к работе (удалить загрязнения, обезжирить ацетоном, промыть горячей водой и высушить склеиваемые поверхности). В каждом опыте должно принимать участие не менее трех образцов.

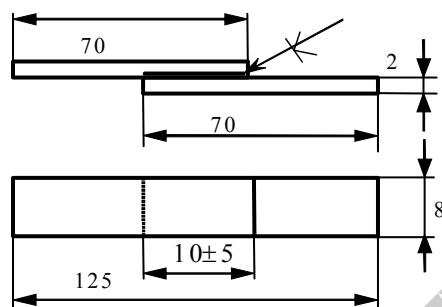


Рис. 4.3. Образцы для исследования прочности соединений

3. Составить матрицу планирования эксперимента применительно к своему варианту исследования (табл. 4.3). Вариант задания определяется преподавателем для каждого студента заранее.

4. Подготовить клей БФ-2, 88НП, эпоксидный к работе. Эпоксидный клей готовится непосредственно перед использованием, так как время его пригодности 30 мин. Составляющие клея - смолу К-115 и полиэтиленполиамин смешать в соотношении 10:1 весовых частей.

5. Клей БФ-2 и 88НП нанести на поверхности, подготовленные к склеиванию, и выдержать их на воздухе соответственно 30 и 10 мин. Потом повторно нанести слой клея и выдержать поверхности на воздухе перед соединением 2-3 мин. Поверхности, склеиваемые эпоксидным клеем, перед нанесением клея нагреть в термостате до температуры 70 °С.

6. В соответствии с матрицей планирования создать удельное давление на склеиваемые образцы в приспособление и при необходимости поместить их в термошкаф и выдержать определенное время.

Примечание: Если для одного из факторов в варианте исследования не указан интервал варьирования, то это означает, что планирование эксперимента осуществляется только по двум факторам, имеющим интервалы варьирования.

7. Определить степень смачиваемости поверхности по величине краевого угла θ в зависимости от степени ее загрязненности: необезжиренная заготовка промыта горячей водой и высушена; заготовка обезжирена в ацетоне. На заготовки наносят стеклянной палочкой по капле каждого типа клея и на установке УКУС-1 определяют угол, характеризующий смачиваемость.

Таблица 4.3

Варианты проведения исследований

Тип клея	Варианты заданий				
	Режимы	1	2	3	4
БФ-4	P, МПа	0,1 - 5	0,3	0,1-0,5	0,1-0,5
	T, °C	150	100-150	100-150	100-150
	t, с	0,5-1	0,5-1	1	0,5-1
ВК-9	P, МПа	0,1-0,3	0,1-0,3	0,3	0,1-0,3
	T, °C	100	50-100	50-100	50-100
	t, с	0,5-1	1	0,5-1	0,5-1
88НП	P, МПа	0,02-0,1	0,1	0,02-0,1	0,02-0,1
	T, °C	50-100	50-100	50	50-100
	t, с	1	0,5-1	0,5-1	0,5-1

9. Определить на испытательном приспособлении механическую прочность клеевых соединений по формуле

$$\sigma = \frac{P}{S}, \quad (4.16)$$

где P - разрушающая нагрузка, Н; S - площадь склеивания, м.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Эскиз испытаний механической прочности соединений.
2. Эскизы типов разрушений соединений.
3. Матрица планирования эксперимента.
4. Основные расчетные формулы.
5. Результаты эксперимента в виде таблиц, графиков и уравнений регрессии.
6. Кривые равного выхода по найденному уравнению регрессии в координатах двух переменных.
7. Оптимальные технологические режимы склеивания.
8. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение адгезии, когезии и аутогезии.
2. Виды связей, возникающих при склеивании материалов.

3. Сущность диффузионной, адсорбционной и электрической теории склеивания.
4. Работа сил адгезии в соответствии с адсорбционной теорией .
5. Как связана работа сил адгезии с углом смачивания поверхности?
6. Влияние растворителя клея на процесс склеивания.
7. Назначение наполнителя и пластификатора, вводимых в клей.
8. Механизм образования двойного электрического слоя на границе раздела фаз.
9. Основные типы разрушений при испытании клеевых соединений.
10. Технологический процесс склеивания.
11. Требования, предъявляемые к клеям.
12. Классификация клеев и порядок их выбора.
13. Характеристика некоторых видов клеев.
14. Сущность планирования методом ПФЭ.
15. Основные расчетные формулы для определения коэффициентов уравнения регрессии и их значимости.
16. Проверка адекватности полученной модели реальному технологическому процессу.

Литература

1. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры /Под ред. А.П.Достанко, Ш.М. Чабдарова. - М.: Радио и связь, 1989.-624 с.
- 2.Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: Учебник/ А.П. Достанко, В.Л. Ланин, А.А. Хмыль, Л.П. Ануфриев .-Мн.: Выш. шк., 2002.- 415 с.
3. Глудкин О.П., Черняев В.Н. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА. - М.: Радио и связь. 1983. - 296 с.
4. Емельянов В.А., Ланин В.Л., Хмыль А.А. Технология печатных, многослойных и коммутационных плат. – Мн.: БГУИР, 1996.-104 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Значения критерия Кохрена для $P = 0,05$

G	N						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0,9958	0,9750	0,9392	0,9057	0,8772	0,8332	0,7880
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6530	0,6025
4	0,9065	0,7674	0,6841	0,6287	0,5895	0,5365	0,4884

Таблица 2

Квантили распределения Стьюдента

f	P=0,05	P=0,01
8	2,31	3,36
12	2,18	3,05
16	2,12	2,92
24	2,06	2,80
30	2,04	2,75

Таблица 3

Значения $F_{0,05}$ (верхние значения) и $F_{0,01}$ (нижние значения)

f_2	f_1				
	4	5	6	7	8
10	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07
	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06
20	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45
	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56

Резерв 2002

Учебное издание

Ланин Владимир Леонидович,
Хмыль Александр Александрович,

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по дисциплинам

**“ТЕХНОЛОГИЯ РЭУ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА”,
“ТЕХНОЛОГИЯ ЭВС”**

для студентов специальностей
«Проектирование и производство РЭС»
и «Электронные вычислительные средства»
всех форм обучения

Редактор Т.А. Лейко

Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16. Бумага	Гарнитура
Печать	. Усл. печ. л. Уч.- изд. л.	Тираж 100 экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Лицензия ЛП № 156 от 30.12. 2002.

Лицензия ЛВ № 509 от 03.08. 2001.

220013, Минск, П. Бровка, 6.