

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**



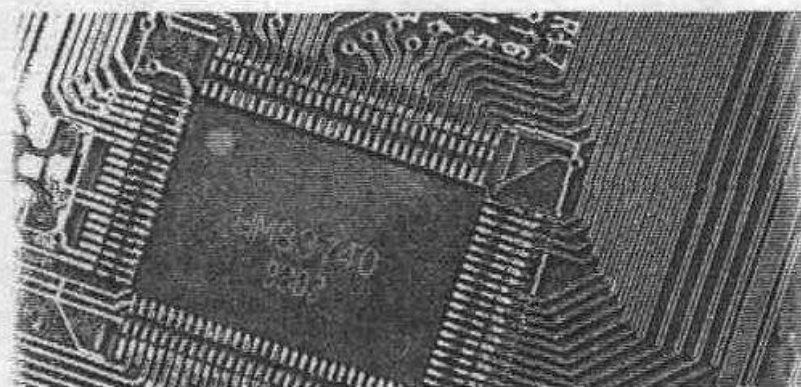
**КАФЕДРА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ**

**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»**

---

**Минск 2003**

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 РЭС И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ”**

**“ТЕХНОЛОГИЯ РЭС”**

для студентов специальностей  
“Проектирование и производство РЭС”,  
“Моделирование и компьютерное проектирование РЭС”  
всех форм обучения

Минск 2011

УДК 621.396.6.002 (075.8)

ББК 32.844 я 73

Л 22

**Ланин В.Л.**

Л 22

Лабораторные работы по дисциплинам «Технология РЭС и моделирование технологических систем», «Технология РЭС» для студентов специальностей “Проектирование и производство РЭС”, “Моделирование и компьютерное проектирование РЭС” всех форм обучения / В.Л. Ланин, А.А. Хмыль– Минск.: БГУИР, 2011. –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, 2011

© БГУИР, 2011

ISBN 985-444-474-0

## СОДЕРЖАНИЕ

### Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА .....	4
--	---

### Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ РЭС ПРИ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....	12
---	----

### Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....	20
---	----

### Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СКЛЕИВАНИЕМ .....	33
---	----

### Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ С ПОВЕРХНО- СТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ЖИДКИМИ СРЕДАМИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ	48
---	----

Литература .....	60
Приложение .....	61

## 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 выбраковки 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.

На практике удобнее пользоваться не абсолютными значениями параметров, а относительными. Для этого уравнение (1.2) разделим на уравнение (1.1) и, произведя 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 (1.4), можно однозначно определить величину производственной погрешности выходного параметра при заданных погрешностях параметров элементов, если известны величины  $A_i$ . Для расчета коэффициентов влияния используют расчетные и статистические методы (малых приращений, корреляционный, планирования эксперимента и регрессионного анализа).

Расчетный метод требует наличия 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 статистической оценкой адекватности полученного уравнения и значимости его коэффициентов.

При **планировании эксперимента** модель имеет вид полинома:

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

где  $y$  - выходной параметр;  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  - коэффициенты уравнения регрессии.

Основой 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;  $\Delta X_i$  - 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

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (1.7)$$

Коэффициенты регрессий определяют по формулам:

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

Таблица 1.1

## Начальные условия эксперимента

Значения факторов	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Основной уровень X <sub>0i</sub>			
Интервал варьирования ΔX <sub>i</sub>			
Верхний уровень (+1)			
Нижний уровень (-1)			

Таблица 1.2

Матрица планирования эксперимента 2<sup>3</sup>

№ опыта	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Выходной параметр		
									Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>
1	+	+	+	+	+	+	+	+			
2	+	+	-	+	-	+	-	-			
3	+	-	+	+	-	-	+	-			
4	+	-	-	+	+	-	-	+			
5	+	+	+	-	+	-	-	-			
6	+	+	-	-	-	-	+	+			
7	+	-	+	-	-	+	-	+			
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:

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

Оценку значимости коэффициентов регрессии проводят 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  $f_l = N(m-1)$  и выбранного уровня значимости. Для оценки адекватности полученной математической модели используют **F-критерий Фишера**

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

где  $\sigma_{ag}^2$  - 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  $\alpha$  - 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 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  $\beta_i$  и рассеяния  $k_i$ :

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

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



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

Для вычисления величин  $\beta_i$  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  $\chi^2$  или Колмогорова  $\lambda$ ) и его параметры. Основными законами распределения 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  $\beta_i$  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

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

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

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

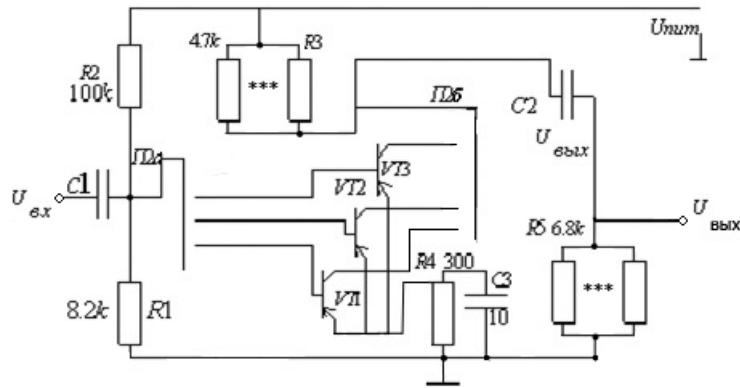


Рис.1.1. Электрическая схема макета для определения производственных погрешностей выходных параметров УНЧ

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 и рассчитать коэффициент усиления УНЧ на средней частоте диапазона для заданных параметров транзистора МП41 и номинальных значений резисторов  $R3$  и  $R5$ .

2. Составить матрицу планирования ПФЭ для  $K=3$  с учетом варианта индивидуального задания (табл. 1.3).

3. 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).

4. Измерить вольтметром В7-73 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.

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

6. Провести обработку статистических данных по стандартной программе PFE 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.

7. Определить частные коэффициенты влияния параметров  $q_i$  на выходной параметр  $K_c$  методом малых приращений. Для этого один из параметров  $q_i$  изменить на  $\pm 10$  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.

Таблица 1.3

## Варианты индивидуальных заданий

Параметр схемы	Номер варианта				
	1	2	3	4	5
$R3$ 4,7 кОм	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 10$
$R5$ 6,8 кОм	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 10$
$h_{21}$ 100	$\pm 10$	$\pm 20$	—	$\pm 20$	$\pm 20$
$h_{11}$ 2,0 кОм	—	—	$\pm 20$	$\pm 20$	$\pm 20$

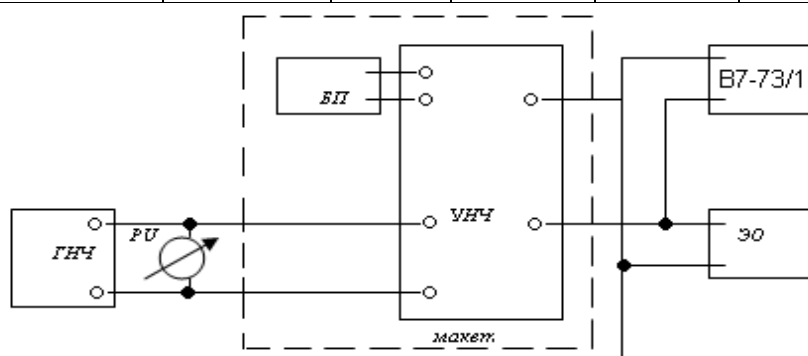


Рис.1.2. Схема исследования погрешностей выходных параметров УНЧ

8. На основании расчетов по программе LAB 1\_2 составить математическую модель с использованием коэффициентов, полученных методом малых приращений.

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

10. Используя стандартную программу HIST, привести обработку статистических данных на ПЭВМ, рассчитать величины  $K_i$  и  $\beta_i$ , построить гистограмму распределения производственных погрешностей элементов схемы.

11. С учетом величин  $K_i$  и  $\beta_i$ , коэффициента корреляции  $r=0,9$  между параметрами  $h_{21}$  и  $h_{11}$ , а также погрешностей, вносимых процессом пайки, вычислить по формуле (1.20) величину поля допуска погрешности коэффициента усиления  $\delta(\Delta K / K)$ .

12. Провести анализ полученной математической модели, определить наиболее влияющие параметры блока, предложить мероприятия по уменьшению погрешности коэффициента усиления.

Таблица 1.4

## Расчет коэффициентов влияния.

Параметр	$\frac{\Delta q_i}{q_i} \cdot 100\%$	$K_{ci}$	$A_i = \frac{\Delta K_i \cdot q_i}{K_{ch} \cdot \Delta q_i}$	$A_{icp}$
$q_1 - R_3$	+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			

**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. Методика расчета допуска на выходной параметр УНЧ.
2. Методы определения коэффициентов влияния.
3. Методика полного факторного эксперимента.
4. Как оценивается значимость коэффициента уравнения регрессии и адекватность модели при ПФЭ?

## Лабораторная работа № 2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ РЭУ ПРИ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

### Цель работы

Построение математической модели методом корреляционного анализа и точностной диаграммы многооперационного технологического процесса, оценка устойчивости процесса.

### 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).

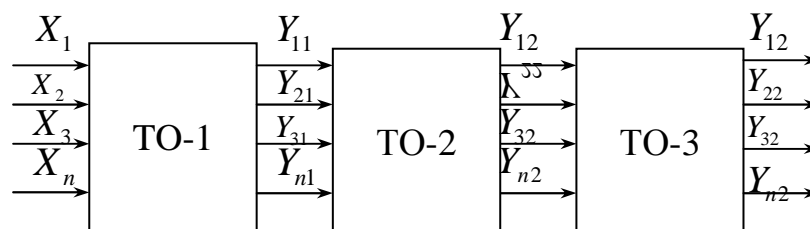


Рис. 2.1. Схема многооперационного технологического процесса:  
ТО-1 - формирующая, ТО-2 - преобразующая, ТО-3 - пассивная операции

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-



ент  $a_0$  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  $\vartheta_h$ , вычисленным относительно условного начала, называется сумма произведений отклонений значений статистического ряда  $\Pi_i$  от  $\Pi_0$  в степени  $h$  на соответствующую частоту  $(n_i / N)$ :

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

где  $n_i$  - число значений  $\Pi_i$  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  $\mu_h$  представляет собой сумму произведений отклонений значений статистического ряда  $\Pi_i$  относительно среднего значения  $\bar{\pi}$  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  $\sigma^2$ , где среднее квадратическое отклонение  $\sigma = +\sqrt{\mu_2}$ .

При рассмотрении рядов распределений двух взаимосвязанных величин пользуются понятиями начальных и центральных смешанных моментов, получение 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**:

$$r_{h1/h2} = \frac{\mu_{h1/h2}}{\sigma_{n_{ex}}^{h1} \cdot \sigma_{n_{вых}}^{h2}}. \quad (2.7)$$

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

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

в) центральные моменты второго порядка

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

г) средние квадратические отклонения

$$\sigma(P_{ex}) = \sqrt{\mu_{2ex}}; \quad \sigma(P_{вых}) = \sqrt{\vartheta_{2вых} - (\bar{P}_{вых})^2}; \quad (2.11)$$

д) начальный и центральный моменты связи

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

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 РЭУ являются пайка, заливка и термотренировка, то уравнение регрессии, связывающее расчетное среднее значение выходного параметра с тем значением, которое будет после изготовления модулей, имеет вид

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

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 термотре-





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

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

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

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<sub>вых</sub>". 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 и рассчитать амплитуду напряжения на нагрузке  $U_{mn}$ , длительность  $t_u$  и частоту импульсов  $f$  по формулам (2.18) - (2.20).

2. Собрать схему измерения выходных параметров функционального модуля (рис.2.5).

3. Установить переключатель П2 в положение I "ПАЙКА". Включить питание макета и произвести измерение выходного параметра, заданного преподавателем в количестве 25 шт. При каждом измерении на световом табло высвечивается номер контролируемого функционального модуля.

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

5. Используя программу LAB 2, рассчитать на ПЭВМ для каждой технологической операции среднее значение выходного параметра  $P_{вых}$ , среднюю квадратическую погрешность, 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.

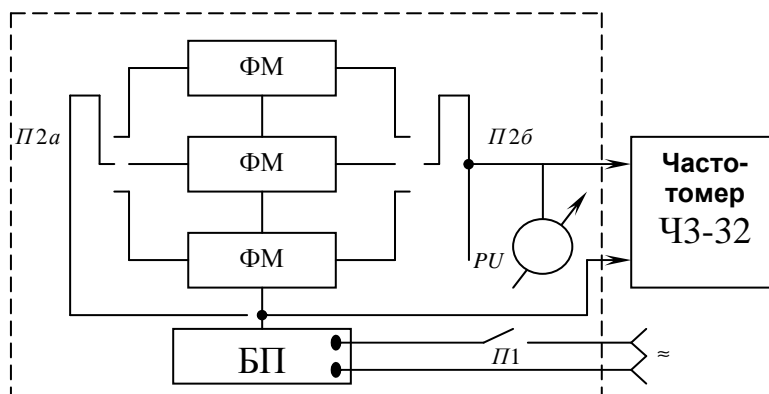


Рис. 2.5. Схема измерения параметров ФМ

6. Построить точностную диаграмму многооперационного технологического процесса, рассчитать коэффициент устойчивости  $T_y$  по каждой операции.

Таблица 2.1

Результаты экспериментов и расчетов

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

7. Построить графически точностную диаграмму многооперационного процесса, оценить влияние каждой операции на среднее значение выходного параметра и его погрешность. Предложить мероприятия по повышению устойчивости многооперационного технологического процесса.

Содержание отчета

1. Схема измерения параметров функционального модуля.
2. Расчеты выходных параметров модуля  $U_{mn}$ ,  $t_u$  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/см<sup>2</sup>);
- резкое уменьшение числа паяных соединений, 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, унификацию и стандартизацию конструкций электронной аппаратуры;
- возможность 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/мм<sup>2</sup>;
- 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, полиамид фольгированный. Медную фольгу к диэлектрикам приклеивают клеем

БФ-4. Выпускают фольгированный стеклотекстолит марок СФ-1-35, СФ-2-35, СФ-1-50, СФ-2-50. 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  $70^{\circ}$ . Для микронных 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 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.

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, неравномерность 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 акрилонитрилбутадиенного сополимера (АБС), толщиной 20...30 мкм, наносимые на 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 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-Vi 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 технологических 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.



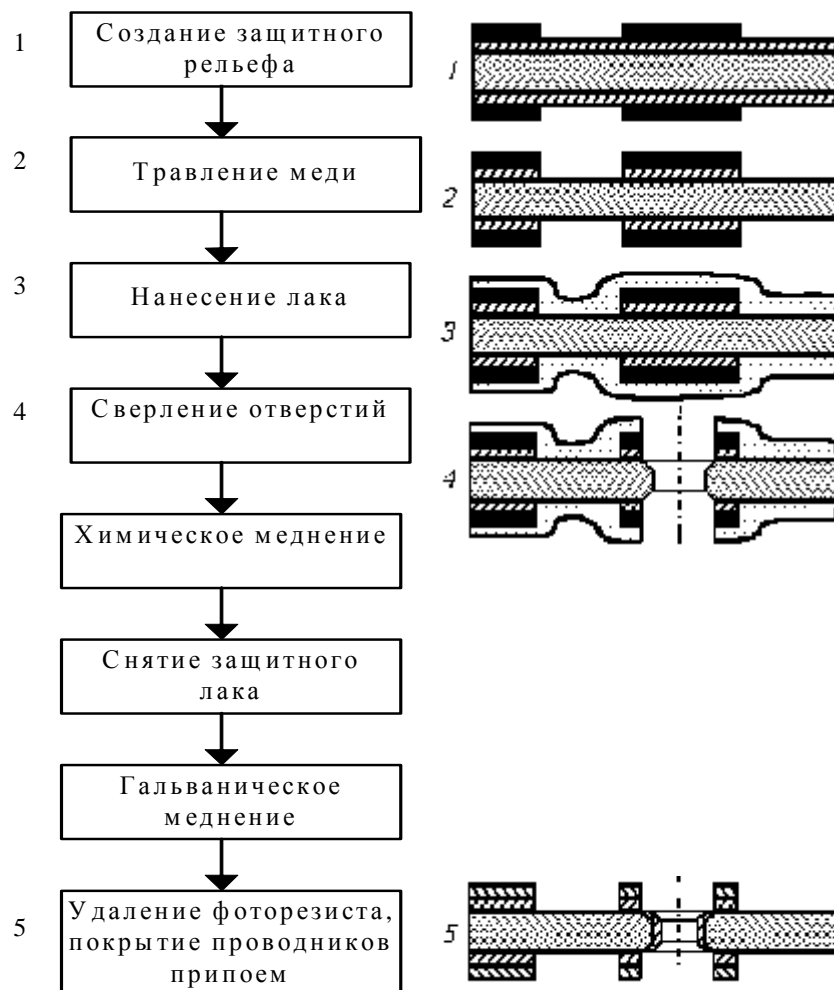


Рис. 3.1. Схема технологического процесса изготовления печатных плат комбинированным негативным методом

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 защитные 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 темного дубления, проявляющийся-

ся 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.

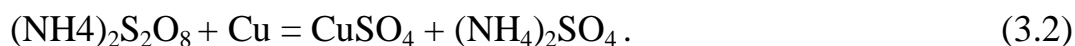
Экспонирование фоторезистов осуществляют в вакуумных светокопировальных рамах, обеспечивающих плотное прилегание фотошаблона к фоторезисту, под воздействием ультрафиолетового излучения (300-450 нм), получаемого от ртутно-паровых или галогенных ламп. Установка для экспонирования с передвижным источником 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/см<sup>3</sup>) 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/м<sup>3</sup>, 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/м<sup>3</sup>.

Преимущества : 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. 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 сенсбилизации 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.

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

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 царапин на поверхности или подтравливания;

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;

снижение сопротивления изоляции - проникновение в межслойные соединения влаги, растворов.

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).

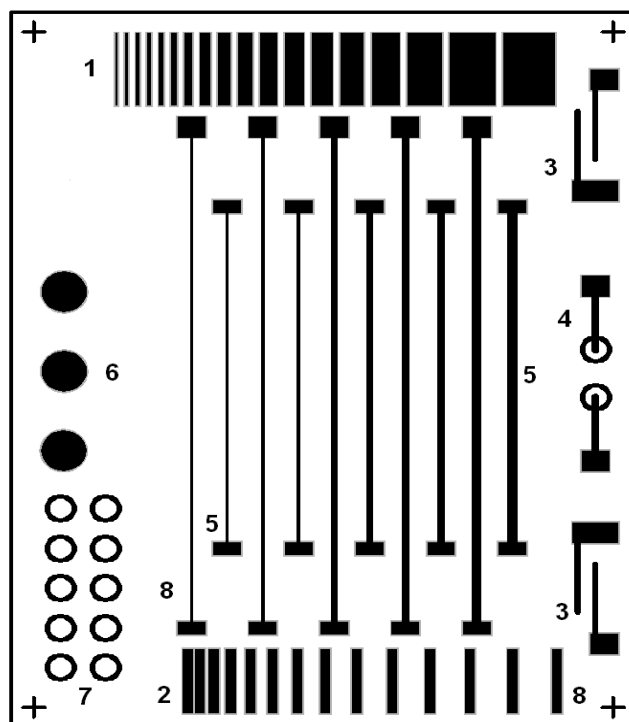


Рис. 3.2. Тестовая печатная плата с контрольными элементами для определения следующих параметров:

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

### Порядок выполнения работы

1. Получить необходимые материалы, инструмент и заготовку из фольгированного материала.
2. Зачистить шлифовальной шкуркой поверхность заготовки, снять заусенцы с помощью напильника.
3. Обезжирить поверхность заготовки с помощью салфетки, смоченной ацетоном. *Работу производить в вытяжном шкафу.*
4. Декапировать плату в растворе соляной кислоты в ванночке 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 50-60<sup>0</sup>С 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.

9. Ознакомиться 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 (рис. 3.3);



Рис. 3.3. Установка экспонирования КП6341

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

10. Совместить фотошаблон с печатной платой и поместить в загрузочную левую рамку. 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 Тор, путем периодического включения и выключения тумблера "Вакуумный насос".

13. Совместить излучение лампы с печатной платой и экспонировать 7-9 мин. Во время экспонирования через 1-1,5 мин смещать лампу на 1-5 см в одну или другую сторону, добиваясь при этом равномерной засветки фоторезиста.

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

15. Выключить тумблер "Вакуумный насос".

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

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

18. Через 3-4 мин после выключения лампы выключить тумблеры "Вентиляторы", "Сеть". Выключить рубильник на передней стенке установки.

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

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

***Проявление производить в вытяжном шкафу. Отработанный раствор слить.***

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

22. 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 °С**;

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

23. Снять фоторезист. Для этого налить в ванночку раствор снимателя; смоченной салфеткой протирать плату до полного снятия фоторезиста.

24. Промыть и высушить плату.

25. 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 видеокамеру с помощью регулировочного винта;

передвигая исследуемую плату по вертикальной и горизонтальным осям, определить качество проводников на плате (целостность, отслоение и подтравливание), а также измерить геометрические размеры проводников;

выключить установку, переведя переключатель в позицию 0.

26. 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 фотошаблоне и изготавливаемой плате после процессов экспонирования и травления, полученные данные занести в табл. 3.1.

27. Измерить сопротивление изоляции между проводниками 3 и 4. Для этого: собрать схему (рис. 3.5); установить измерительные щупы на контактные площадки исследуемых проводников;



Рис. 3.4 Передняя панель МЕГ-9

- Переключатель рода работы установить в положение “РАЗРЯД” (Рис.3.4), переключатель пределов измерений в положение “X1” МΩ.
- Нажать кнопку “ПИТАНИЕ ПРОВ” и вращением по часовой стрелке ручки “ПИТАНИЕ УСТ” включить прибор и установить номинальные значения напряжения питания, стрелки прибора в зелёной зоне “КОНТРОЛЬ ПИТАНИЯ”.
- Посредством ручки “УСТ ∞” добиться установки стрелки прибора на отметку ∞
- Нажать кнопку “ПРОВ. 1 МΩ” и вращением ручки “УСТ. 1 МΩ” добиться отклонения стрелки прибора на отметку шкалы “1”.
- Подключить измерительный объект к зажимам “RX”
- Ручку переключателя рода работы перевести последовательно в положение “ЗАРЯД” и “ИЗМЕРЕНИЕ”.
- При подключённом измеряемом объекте “RX” проверить напряжение питания, если необходимо восстановить номинальное значение напряжения в соответствии с пунктом 2 инструкции.
- Переключением пределов измерений “10”, “10<sup>2</sup>”, “10<sup>3</sup>”, “100<sup>3</sup>” получить отклонение стрелки в отсчётной части шкалы (отметка 1-20) и снять показание прибора с учётом коэффициента, указываемого ручкой переключателя пределов измерений.
- По окончании работы, выключить питание прибора поворотом ручки “ПИТАНИЕ УСТ” против часовой стрелки до щелчка и совмещения белой точки ручки “ПИТАНИЕ УСТ” с отметкой “ВЫКЛ” на панели.

28. Определить удельное электрическое сопротивление проводников. Для этого собрать схему измерения падения потенциала на проводнике (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 наибольшей ширины (см. рис. 3.2.);

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				

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 <sup>2</sup>						
3. Сопротивление изоляции, МОм						
4. Прочность сцепления с основанием, Па						
5. Количество перепаек						



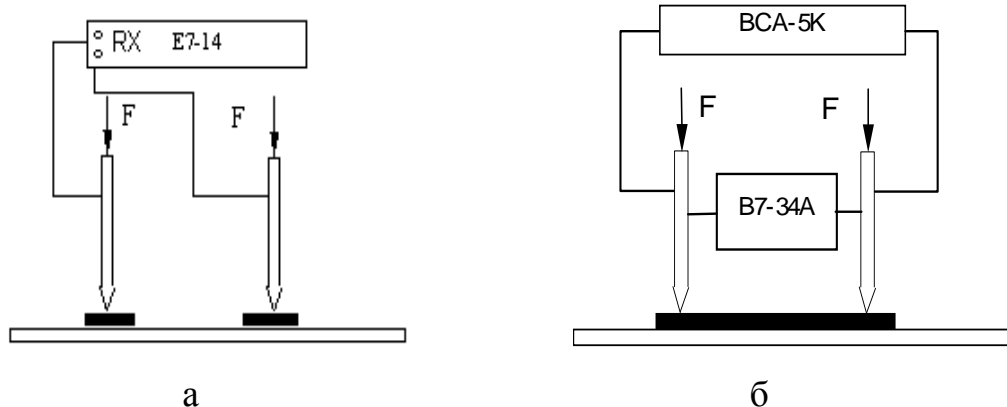


Рис. 3.5 Схема измерения сопротивления изоляции (а) и падения напряжения

вывести ручку регулировки напряжения источника тока ВСА-5К в крайнее левое положение и включить его ручкой "Режим работы" в положение 1 ступень;

вращая ручку регулировки напряжения вправо, выставить ток 5 А;  
измерить величину падения напряжения на проводнике с помощью вольтметра В7-34А;

выключить источник тока и переставить измерительные щупы на контактные площадки следующего проводника.

Повторить измерения для остальных проводников. В процессе измерений следить, чтобы на передней панели вольтметра была включена кнопка "U";

рассчитать удельное электрическое сопротивление проводников

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

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

29. Определить токонесущую способность проводников. Для этого:

из схемы (рис. 3.5 б) 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 источник тока ручкой "Режим работы" в положение 1 ступени;  
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.

30. 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.



Рис. 3.6 Устройство контроля прочности печатных проводников

31. Определить усилие отрыва. Для этого залудить контактную площадку на плате. Снять верхний зажим в устройстве (рис.3.6) и припаять к ней специальный стержень с контактной площадкой. Закрепить стержень с верхним зажимом в устройстве, включить источник питания в устройстве, переключить тумблер так, что бы плата двигалась в низ

с помощью устройства для определения прочности сцепления оторвать контактную площадку от основания, зафиксировать усилие отрыва на шкале прибора (цена деления 100г.)

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  $\rho_m$ ,  $I_{доп}$ ,  $\sigma_B$ .
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 фоторезисты используются в производстве печатных плат?
5. 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 физические, 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  $\mu$ , 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 клеевого соединения протекает в две стадии. На первой стадии в результате броуновского движения происходит миграция больших молекул полимера из раствора или расплава к поверхности субстрата. Это приводит к накоплению 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 за счет действия сил Ван-дер-Ваальса.

фицируется 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  $5 \text{ \AA}$ , 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, 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  $\Theta$  можно получить, если рассмотреть проекцию их на горизонтальную плоскость (поверхность твердого тела):

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

Подставив данное выражение в уравнение (4.1), получим

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

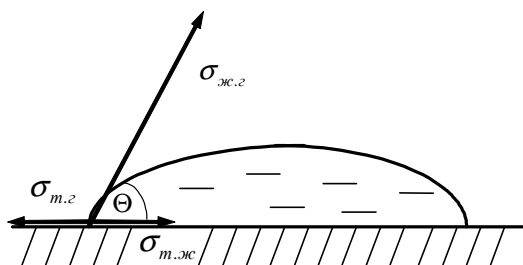


Рис. 4.1 Растекание капли жидкости по твердой поверхности

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  $90^\circ$ , то величина работы адгезии будет равна половине величины работы когезии. При  $\Theta=180^\circ$  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;  $\alpha$  - 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 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 возникающей 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 образова-



ния 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 с соединяемых поверхностей удалить загрязнения, обезжирить их в трихлорэтилене или в ацетоне, 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 на поверхность изделия, примыкающего 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 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.

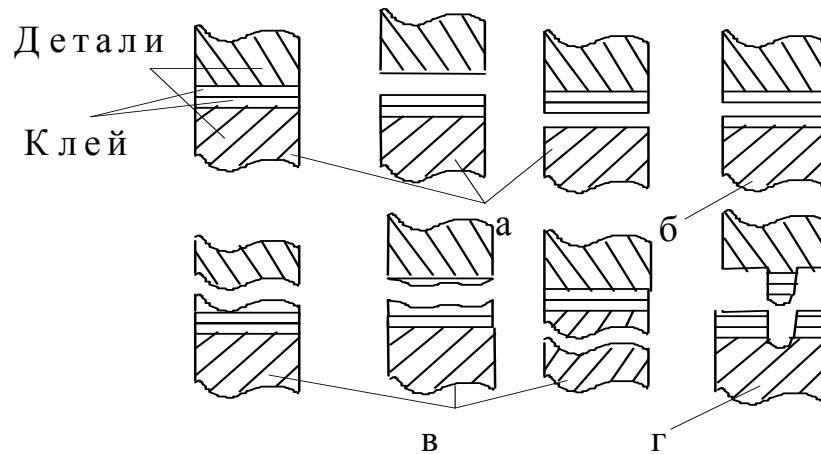


Рис. 4.2. Типы разрушений:

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. Клей должен обладать:

- 1) удовлетворительными электроизоляционными свойствами;
- 2) хорошей адгезией к различным материалам;
- 3) достаточной вибропрочностью, вязкостью, позволяющей наносить его на вертикальные поверхности;
- 4) жизнеспособностью и быстрой отверждением при нормальных условиях (20-30<sup>0</sup>С); способностью выдерживать температуру паяльника, равную 250<sup>0</sup>С, 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, 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

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  $\sigma_g$  или предел прочности на срез  $\sigma_{cp}$  (Па). Независимыми переменными являются технологические режимы склеивания - температура сушки, время сушки, удельное давление. Остальные режимы - подготовка поверхности, нанесение слоя клеяющего грунта и его сушка - должны в данном исследовании быть одинаковыми для всех образцов.

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.

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

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_0 \tilde{y}_i}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \tilde{y}_i}{N}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i x_j \tilde{y}_i}{N} \quad (4.6)$$

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

$$t_c = \frac{|b_i|}{s \{b_i\}}; \quad s^2 \{b_i\} = \frac{s^2 \{\tilde{y}\}}{N}; \quad (4.7)$$

$$s^2 \{\tilde{y}\} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \tilde{y}_i)}{N(m-1)}. \quad (4.8)$$

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.

Таблица 4.1

## 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, 0,6МПа	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, 0,2МПа	36-38	$2 \cdot 10^{10}$	20	Крепление ЭРЭ к металлу, гетинаксу, стеклотекстолиту. Склеивание разрезных магнитопроводов, сердечников магнитных головок
Д-9	Эпоксидная смола, дигутилфталат, 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				
				t, ч (x1)		p, МПа (x2)		
Основной уровень, x <sub>0</sub>								
Интервал варьирования, Δx <sub>i</sub>								
Верхний уровень (+1)								
Нижний уровень (-1)								
№ опыта	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	Параметр оптим. y <sub>i</sub> , Н			y <sub>cp</sub> , Н	S <sub>2</sub> (y)
				1	2	3		
1	+	+	+					
2	+	-	+					
3	+	+	-					
4	+	-	-					

В противном случае коэффициент  $b$  считается статистически незначимым и соответствующий член исключается из уравнения регрессии без пересчета остальных. Полученное уравнение регрессии должно адекватно описывать изучаемый технологический процесс. Проверка гипотезы адекватности проводится с помощью критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S^2_{ост}}{S^2\{\tilde{y}\}}, \quad S^2_{ост} = \frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - \bar{y})^2}{N - \alpha}, \quad (4.9)$$

где  $S^2_{ост}$  - остаточная дисперсия, обусловленная как ошибкой эксперимента,  $\hat{y}_i$  - величина выходного параметра, рассчитанная по найденному уравнению регрессии;  $\alpha$  - 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.

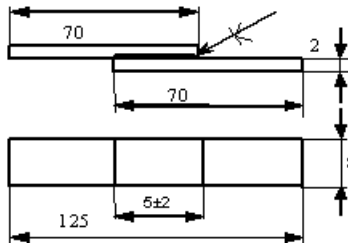


Рис. 4.3. Образцы для исследования прочности соединений

3. Рассчитать теоретическую прочность соединений для реальных размеров нахлестки. Составить матрицу планирования эксперимента применительно к своему варианту исследования (табл. 4.3). Вариант задания определяется преподавателем для каждого студента заранее.

4. Клей БФ-2 нанести на поверхности, подготовленные к склеиванию, и выдержать их на воздухе 10 мин. Потом повторно нанести слой клея и выдержать поверхности на воздухе перед соединением 3-5 мин.

5. В соответствии с матрицей планирования создать удельное давление на склеиваемые образцы в приспособлении. Склеиваемые образцы склеить внахлест по рис. 4.3. и поместить в термостат при температуре 100°C на время, соответственно 30 и 20 мин. Склеенные образцы вынуть из термостатов, охладить 8-10 мин.

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.

6. Определить на испытательном приспособлении разрушающую нагрузку и рассчитать механическую прочность клеевых соединений по формуле

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (4.10)$$

где  $F$  - разрушающая нагрузка, Н;  $S$  - площадь склеивания, м<sup>2</sup>.

7. Обработать экспериментальные данные по программе PFE с помощью ПЭВМ, провести анализ математической модели склеивания, определить наиболее влияющие технологические параметры процесса, проанализировать тип разрушения клеевых соединений.

Варианты проведения исследований

Тип клея	Варианты заданий				
	Режимы	1	2	3	4
БФ-4	Р, МПа	0,1 – 0,5	0,3	0,1- 0,5	0,1- 0,5
	Т, °С	150	100-150	100- 150	100- 150
	t, ч	0,5- 1,0	0,5- 1,0	1,0	0,5- 1,0
ВК-9	Р, МПа	0,1-0,3	0,1-0,3	0,3	0,1-0,3
	Т, °С	100	50-100	50-100	50-100
	t, ч	0,5- 1,0	1,0	0,5- 1,0	0,5- 1,0
88НП	Р, МПа	0,02- 0,1	0,1	0,02- 0,1	0,02- 0,1
	Т, °С	50- 100	50- 100	50	50- 100
	t, ч	1,0	0,5- 1,0	0,5- 1,0	0,5- 1,0

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Эскиз испытаний механической прочности соединений и теоретический расчет прочности соединения.
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 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. Как связана работа сил адгезии с углом смачивания поверхности?
5. Влияние растворителя клея на процесс склеивания.
6. Назначение наполнителя и пластификатора, вводимых в клей.
7. Основные типы разрушений при испытании клеевых соединений.
8. Операции технологического процесса склеивания.
9. Требования, предъявляемые к клеям и их характеристика клеев.
10. Расчетные формулы для определения коэффициентов уравнения регрессии и их значимости.



## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ЖИДКИМИ СРЕДАМИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ**

### **Цель работы**

Изучение механизма ультразвуковой очистки поверхности твердых тел жидкими средами от загрязнений, получение навыков работы с ультразвуковым оборудованием, исследование влияния параметров процесса на качество очистки.

### **Теоретические сведения**

Надежность РЭУ во многом зависит от обеспечения высокой чистоты деталей аппаратуры в процессе их изготовления. Тщательная очистка требуется для подложек и корпусов интегральных схем, коммутирующих элементов, печатных, многослойных и керамических плат. Мельчайшие пылинки, остатки жировых и неорганических загрязнений могут явиться причинами короткого замыкания, отказа или выхода из строя изделия. Анализ причин отказов изделий электроники показывает, что их четвертая часть приходится на долю плохого качества очистки поверхностей. Моющими веществами в электронике всегда были органические растворители. Ручная очистка приводила к значительному количеству брака, травматизму, выбросам паров растворителей в атмосферу и загрязнению окружающей среды. Хлорированные углеводороды токсичны, обладают канцерогенным и мутагенным воздействием, образуют смог и требуют утилизации отходов методом захоронения. Общеизвестен основной недостаток спиртов: их пожаро- и взрывоопасность. Хладоны разрушают озоновый слой и усиливают парниковый эффект.

В блоках на печатных платах загрязнениями являются остатки травильных растворов, защитных резистов, флюсов и продуктов их распада, жировые загрязнения от инструмента и рук рабочего. Очистка изделий вручную с помощью кисти в спирто–бензиновой смеси характеризуется низкой производительностью, загрязнением окружающей среды ядовитыми парами растворителей. Более эффективна чистка в ваннах с механическим перемешиванием растворителя либо с применением низкочастотных вибраций (50 или 100 Гц). Существенное увеличение производительности процесса очистки (в 8–10 раз) при одновременном повышении ее качества достигается использованием ультразвуковых (УЗ) колебаний, вводимых в жидкие среды с помощью различного рода излучателей. Ультразвук широко применяется в электронной промышленности для очистки подложек и корпусов интегральных схем, керамических оснований резисторов и конденсаторов, элементов электронных ламп. Применение ультразвука для очистки имеет определенные ограничения, поскольку при неправильно выбранных режимах возможны разрушения защитных лакокрасочных по-

крытий, маркировки, нарушение герметичности и внутренние повреждения полупроводниковых приборов и интегральных схем. Таким образом, рациональное применение УЗ очистки требует изучения ее механизма, выбора оптимальных параметров и эффективных средств контроля.

Ультразвуковыми называют упругие колебания в диапазоне  $10^4$ - $10^9$  Гц. В зависимости от траектории передачи колебаний УЗ волны подразделяются на продольные, поперечные, крутильные и изгибные. В жидкостях имеют место только продольные колебания, т.к. жидкая среда не имеет упругости формы. Звуковые волны малой амплитуды описываются уравнением

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{c^2 \cdot \partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (5.1)$$

где  $y$  – смещение частицы,  $x$  – координата частицы,  $t$  – время,  $c$  – скорость звука в среде.

Решением (5.1) является уравнение плоской волны:

$$y = A \sin(\omega t - kx), \quad (5.2)$$

где  $A$  - амплитуда,  $\omega$  - круговая частота;  $k$  - волновое число,  $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина УЗ волны.

УЗ волну в жидкости характеризуют: переменное звуковое давление  $P_{зв}$ , энергия  $E$  и интенсивность  $I$ . На основании уравнения плоской бегущей волны (5.2) величина звукового давления равна:

$$P_{зв} = \rho c \omega A \cos(\omega t - kx), \quad (5.3)$$

где  $\rho$  - плотность среды.

Амплитудное значение звукового давления  $P_A$  соответствует фазе колебаний, для которой значение косинуса равно единице:

$$P_A = \rho c \omega, \quad (5.4)$$

Для практических целей используют среднее (эффективное) значение звукового давления  $P_{эф}$ , которое можно определить по рис.5.1. Полная площадь, ограниченная синусоидой и осью абсцисс, за время полупериода  $T/2$  равна:

$$S = \int_0^{T/2} P_A \sin \omega \tau d \tau = \frac{P_A}{\pi} \quad (5.5)$$

Эту площадь можно заменить на площадь прямоугольника, основание которого равно  $T/2$ , а высота - величине  $P_{эф}$ :

$$P_A \frac{T}{\pi} = P_{эф} \frac{T}{2}, \quad (5.6)$$

откуда

$$P_{эф} = (2/\pi)P_A \approx 0.7 P_A, \quad (5.7)$$

В экспериментальных целях звуковое давление в жидкости можно измерить гидрофоном, в котором датчиком является пластина из пьезокерамики ЦТС-19. Энергия, излучаемая звуковой волной в единице объема среды, прямо пропорциональна квадратам круговой частоты и амплитуды колебаний:

$$E = (\rho w^2 A^2)/2. \quad (5.8)$$

Величина интенсивности определяется энергией, излучаемой в среду с единицы излучающей поверхности в единицу времени. Поскольку за 1с звуковая волна распространяется на расстояние, определяемое скоростью звука  $c$ , то интенсивность

$$I = Ec = (\rho c w^2 A^2)/2 = P_A^2/(2\rho c). \quad (5.9)$$

В инженерной практике интенсивность колебаний определяют калориметрическим путем, сравнивая повышение температуры в калориметре под действием постоянного электрического тока и УЗ колебаний. Длина волны УЗ колебаний в жидкой среде зависит от скорости звука в данной среде и частоты:

$$\lambda = c/f. \quad (5.10)$$

Скорость звука зависит от температуры, давления и концентрации растворов:

$$c = c_0 + \alpha_T \Delta T, \quad (5.11)$$

где  $c_0$  - скорость звука при 20°C, 1482 м/с;  $\alpha_T$  - температурный коэффициент, 2,5 м/с·град;  $\Delta T$  - повышение температуры.

В технологических процессах важную роль играют вторичные эффекты, возникающие в жидкой среде при распространении УЗ волн значительной амплитуды. К их числу относятся: кавитация, давление УЗ волны, акустические течения.

**Кавитация** – сложный процесс, связанный с возникновением, развитием и захлопыванием пузырьков и полостей с образованием ударных микроволн и локальных тепловых микрополей. В жидкостях стабильно существует множество мельчайших пузырьков микронных размеров, заполненных газом или паром данной жидкости. Эти пузырьки являются зародышами кавитации и сосредотачиваются на стенках сосудов, на взвешенных в жидкости твердых частицах в местах неоднородностей и др. Их возникновение обусловлено тепловыми флуктуациями в жидкости, а также внешними воздействиями: космической радиацией и др. В обычных условиях парогазовые пузырьки находятся в жидкости в устойчивом состоянии, т.к. поверхностное натяжение и гидростатическое

давление  $P_0$ , действующее на пузырек радиусом  $R_0$ , уравниваются внутренним давлением парогазовой смеси:

$$P_n + P_z = P_0 + \left( \frac{2\sigma}{R_0} \right), \quad (5.12)$$

где  $P_n$  - давление насыщенного пара;  $P_z$  - давление газа.

При прохождении через жидкость УЗ волн значительной амплитуды зародышами кавитации теряют устойчивость, начинают расти в фазе растяжения волны. Одновременно в жидкости появляются разрывы в виде полостей, каверн, которые активно пульсируют в ультразвуковом поле. На рис. 5.1 отражены характерные особенности развития кавитационной полости начальным радиусом  $R_0$ . На начальном участке 0-1 наблюдается медленный рост полости, так как сила поверхностного натяжения  $2\sigma/R$  препятствует ее росту.

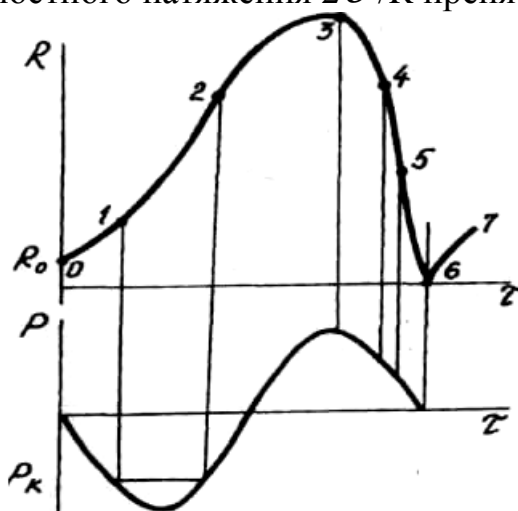


Рис. 5.1. Динамика кавитационной полости за один период колебаний

Участок 1-2 совпадает с наибольшим значением отрицательного звукового давления при одновременном снижении силы поверхностного натяжения, что способствует ускоренному росту кавитационной полости.

На участке 2-3 полость увлекается присоединенной массой жидкости и продолжает расти по инерции, однако начинает сказываться тормозящее действие силы статического давления. На участке 3-4 под действием положительного давления звуковой волны начинается фаза сжатия полости и на участке 4-5 скорость уменьшения стенок полости стремительно растет. Звуковое давление, статическое давление и поверхностное натяжение действуют в одном направлении к центру кавитационного пузырька, поэтому величина радиальной скорости достигает наибольшего значения. В последней стадии сжатия 5-6 радиальная скорость уменьшается вследствие значительного повышения давления парогазовой смеси внутри пузырька. Кинетическая энергия присоединенной массы жидкости переходит в потенциальную энергию сжатого газа.

При вторичном расширении (участок 6-7) сжатый газ стремительно расширяется и в микрообъеме жидкости формируется ударная волна, обладающая

большой мощностью. Таким образом, энергия, накопленная кавитационной полостью в течение периода колебаний, выделяется за малое время в конечной стадии. При этих условиях теплообмен с внешней средой практически не происходит, процесс сжатия близок к адиабатическому, что приводит к значительному повышению температуры внутри кавитационной полости.

В кавитационных процессах участвуют пузырьки, начальный радиус которых  $R_0$  больше некоторого критического радиуса  $R_{кр}$ , но меньше резонансного  $R_{рез}$ :

$$R_{кр} < R_0 < R_{рез}. \quad (5.13)$$

Значение  $R_{кр}$  можно определить из выражения

$$R_{кр} = 4\sigma [3(0.7P_A + P_{п} + P_0)]. \quad (5.14)$$

Анализ выражения (5.14) показывает, что для жидкостей с большим коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma$  и повышением статического давления  $P_0$  процесс кавитации наступает при больших размерах  $R_{кр}$ . Пузырьки с размерами, большими  $R_{рез}$  вытесняются на поверхность жидкости. Значение  $R_{рез}$  находят по формуле

$$R_{рез} = \frac{1}{2\pi \cdot f} \sqrt{\frac{\gamma \cdot P_0}{\rho}}, \quad (5.15)$$

где  $\gamma$  - показатель адиабаты.

Поскольку  $R_{рез}$  обратно пропорциональна частоте колебаний, то с ее повышением процесс кавитации будет осуществляться пузырьками все меньших и меньших размеров, не обладающих большой энергией для кавитационной обработки материалов. В качестве критерия эрозионной активности кавитации принята величина

$$K = R^3 \max / R^3 \min_{\Delta\tau \cdot f}, \quad (5.16)$$

которая характеризует трансформацию энергии в процессе расширения и захлопывания кавитационной полости. Анализируя зависимость критерия эрозионной активности от различных параметров процесса кавитации, составлен следующий ряд, где параметры расположены по мере возрастания их роли в увеличении критерия  $K$ :

$$\rho \Rightarrow \sigma \Rightarrow \mu \Rightarrow P_{п} \Rightarrow f \Rightarrow P_0 \Rightarrow P_A, \quad (5.17)$$

Таким образом, наибольший вклад в повышение интенсивности кавитации вносят звуковое  $P_A$  и статическое  $P_0$  давления. Наибольшее значение критерия  $K$  достигается при соотношении  $P_0 = 0,5 P_A$ , что вызывает необходимость создавать в ряде случаев УЗ технологические установки с избыточным давлением в рабочем объеме.

Для оценки эрозионной активности УЗ кавитации используют эрозионные тесты с применением алюминиевой фольги, люминесценцию, химические реакции, спектральную оценку кавитационного шума и др.

При распространении ультразвуковой волны наряду с переменным звуковым давлением возникает однонаправленное **давление ультразвуковой волны**, которое проявляется при ее падении на препятствие. Величина давления  $P_{зв}$  определяется плотностью потока энергии волны  $E$ , приходящейся на единицу площади в единицу времени:

$$P_{зв} = (1 + k)E, \quad (5.18)$$

где  $k$  - коэффициент отражения волны от препятствия.

Если звуковая волна полностью отражается (например, на границе жидкость – газ), то  $k = 1$ :

$$P_{зв} = 2E = \frac{2I}{c}. \quad (5.19)$$

По величине однонаправленное давление УЗ волны значительно меньше переменного звукового, оно способствует увеличению подъемной силы, действующей на пузырьки газа в жидкости, а также создает вспучивание жидкости на границе жидкость-газ.

**Акустические потоки**, возникающие в жидкости при воздействии ультразвука, носят вихревой характер и подразделяются на:

- мелкомасштабные (шлихтинговские), размер которых существенно меньше длины волны;
- среднемасштабные (релеевские), близкие к длине волны;
- крупномасштабные (эскартовские), значительно превышающие длину волны.

Наибольшую роль играют мелкомасштабные течения (микротоки), которые интенсивно перемешивают жидкость в пограничном слое, способствуя удалению поверхностных загрязнений, ускоряя диффузионные, тепло- и массообменные процессы. Шлихтинговское акустическое течение возникает вблизи границы с твердой поверхностью в пограничном слое, толщиной  $\delta$ , и представляет собой вихри масштабом  $\lambda/4 \times 1,9 \delta$  (рис. 5.2).

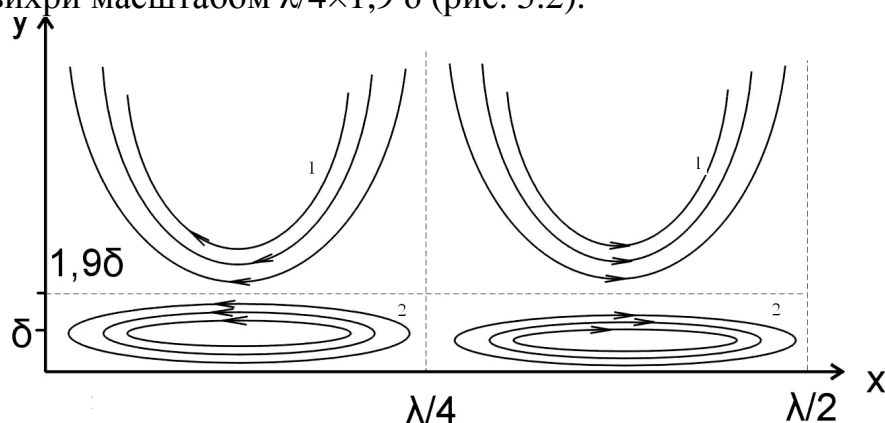


Рис. 5.2. Акустические течения : 1 – рэлеевское, 2 – шлихтинговское

Выражения нормальной и тангенциальной компонент потока имеют вид:

$$\bar{v}_x = -\frac{v_0^2}{4c_0}(\mu - \mu^2) \sin 2kx, \quad (5.20)$$

$$\bar{v}_y = -\frac{v_0^2}{4c_0}k\delta\mu^2 \cos 2kx, \quad (5.21)$$

где  $\mu$  - относительное расстояние ( $\mu = y/\delta$ ),  $y$  - текущая координата фронта волны.

Толщина акустического пограничного слоя  $\delta$  :

$$\delta = \sqrt{\frac{\eta}{\pi \cdot f}}, \quad (5.22)$$

где  $\eta$  - вязкость жидкой среды,  $f$  - частота УЗ колебаний.

Механизм УЗ очистки проявляется в совместном действии кавитации и акустических микропотоков. Кавитационные пузырьки при захлопывании создают микроударные нагрузки на поверхности пленок загрязнений, что вызывает появление в них трещин, следов эрозии. Отслоение пленок вызывают пульсирующие пузырьки, которые, увеличиваясь в размерах и перемещаясь по очищаемой поверхности, счищают пленку загрязнений. Возникающие в пограничном слое микропотоки уносят частицы загрязнений, интенсифицируют процесс их растворения (рис. 5.3).

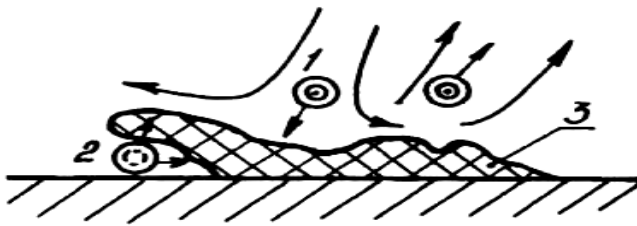


Рис. 5.3. Схема отслоения пленок загрязнений: 1,2- захлопывающийся и пульсирующий пузырьки, 3- пленка

К технологическим режимам УЗ очистки относятся интенсивность и частота колебаний, время воздействия ультразвука, расстояние от излучателя, состав и температура раствора. Для очистки электронных изделий применение больших интенсивностей недопустимо, так как в условиях развитой кавитации может вызвать эрозионное разрушение лакокрасочных покрытий, нарушение герметичности электронных компонентов. Исследованиями установлен оптимальный диапазон интенсивности УЗ-колебаний в пределах  $(0,4-0,6)10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, где степень очистки близка к 100%. Степень очистки определяется как потеря массы платы:

$$K = (m_1 - m_2) / (m_1 - m_0) 100\%, \quad (5.23)$$

где  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  - массы чистой платы, загрязненной платы и платы после очистки соответственно.

При очистке электронных и оптических изделий предпочтение отдают докавитационным режимам очистки, поэтому рекомендуется использовать более высокие частоты, обеспечивающие введение в жидкость большей интенсивности в этом режиме. Так, на частоте 44 кГц происходит более интенсивное пере-

мешивание растворителя и унос загрязнений микропотоками. С увеличением частоты уменьшается длина волны, что способствует более тщательной очистке труднодоступных элементов конструкции. Степень очистки на частоте 22 кГц с увеличением времени превышает 100%, т.к. имеет место эрозионное разрушение печатной платы и защитных покрытий электронных компонентов.

В область 16–20 кГц попадает большее количество собственных резонансных частот колебаний внутренних выводов полупроводниковых приборов и интегральных схем, поэтому уход в область более высоких частот предупредит возможные их повреждения при больших интенсивностях УЗ колебаний. Время УЗ очистки выбирают в зависимости от степени загрязнения в пределах 60 -120 с при интенсивности УЗ  $(0,4-0,8)10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Использование калориметров для количественной оценки интенсивности колебаний на практике затруднительно, поэтому рациональнее измерять кавитационные эффекты с помощью радиотехнических методов. Экспериментально установлено, что наибольшая спектральная плотность кавитационного шума находится в полосе от 20-й до 40-й гармоники основной частоты УЗ преобразователя. Поэтому для оценки кавитационного давления в жидкости предложено измерять квадрат шумов в диапазоне наибольшей спектральной плотности шума с помощью кавитометра.

Для очистки на частотах 22-44 кГц кавитационное давление в ванне на расстоянии 20 мм от плоскости излучателя должно быть в пределах 100–150Па.

Важными параметрами являются расстояние от излучателя (дно моющей камеры) до очищаемой детали  $h$ , а также высота уровня жидкости в ванне  $H$  (рис.5.4). Высота жидкости  $H$  для камеры является резонатором, и в случае резонанса УЗ волны полностью отражаются от поверхности раздела сред жидкость-воздух, совпадают по фазе с падающей волной и складываются, многократно повышая давление в узлах пучности давления  $\lambda/4$  (точки 1 и 2 рис.5.4). Из этих соображений расположение очищаемой детали должно быть не в пучности колебаний, а в узле колебаний, где находится пучность давления. Высота жидкости должна быть равна  $\lambda/4(2n+1)$ , где  $n$  - натуральное число из ряда 1,2,3,4...

Состав растворителя не должен растворять лакокрасочные покрытия, маркировочные обозначения, оказывать коррозионное воздействие на материал. Для очистки применяют различные составы моющих жидкостей в поверхностно-активными веществами (ПАВ). Качество очистки деталей оценивают либо по величине остаточных загрязнений (не более  $5 \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup>), либо по смачиваемости поверхности водой путем измерения краевого угла смачивания (до 10 град).

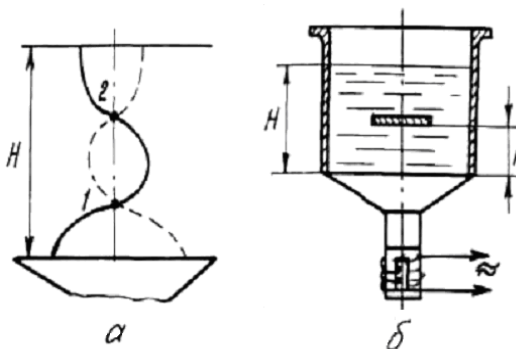


Рис. 5.4. Диаграмма амплитуд смещений частиц жидкости (а) и схема УЗ ванны (б)



## Технологическое оборудование и приборы

Современное технологическое оборудование для УЗ очистки состоит из УЗ технологических систем с использованием широкополосных пьезокерамических преобразователей, модульных транзисторных генераторов с выходной мощностью 0,25–0,75 кВт на рабочую частоту 44 кГц. УЗ технологические системы для процессов удаления загрязнений включают различные по конструкции ванны, которые используются для очистки как в непроточных средах на основе водных растворов ПАВ, так и в проточной воде, а также в органических растворителях. Ванны для очистки в непроточных и проточных моющих средах (рис. 5.5, а, б) отличаются друг от друга тем, что последние оснащены переливным карманом или воронкой. Для повышения эффективности обмена моющей среды в рабочем объёме ванны, подачу свежих порций раствора необходимо осуществлять противотоком, как это показано на рис. 5.5,б слева, сверху и снизу ванны через ряд отверстий небольшого диаметра (3 – 6 мм). Верхний ряд отверстий должен быть затоплен на глубину  $h = 8 - 15$  мм. Такая конструкция ванны для очистки в проточной моющей среде будет обладать большой равномерностью распределения кавитационного давления, поскольку потоки моющей среды имеют практически ламинарный характер.

В верхней части ванны для очистки в органических растворителях происходит конденсация паров растворителя, поэтому уровень растворителя должен составлять  $1/3$  полной высоты ванны, а ширина и длина ванны должны относиться к высоте как  $1/3$  и  $1/2$ . Такой выбор соотношений обеспечивает минимальные потери растворителя при испарении.

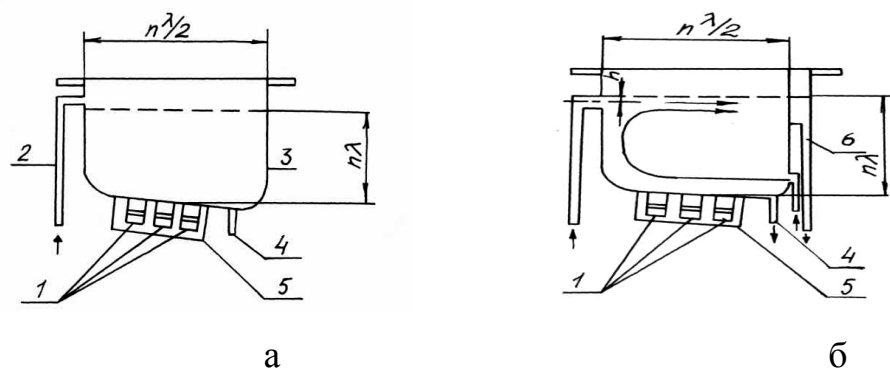


Рис. 5.5. Конструкции УЗ ванн очистки: 1- преобразователи, 2 – переливной патрубков, 3 – корпус, 4 – сливной патрубков, 5 – экран; 6 – переливной карман

Ёмкость ванн выбирается в зависимости от габаритных размеров обрабатываемой детали или при групповой очистке в зависимости от заданной производительности установки и необходимого времени очистки в каждой ванне. Основное требование, которое необходимо выполнять для обеспечения равномерного воздействия УЗ колебаний на объект очистки – кратность линейных размеров ванны в поперечном сечении  $\lambda/2$ , а оптимальная высота уровня моющей среды кратна  $\lambda$ .

Для исследования процесса кавитации в жидкости используется УЗ установка (рис. 5.6), пьезоэлектрический датчик, кавитометр. УЗ генератор является настольным прибором мощностью до 1,0 кВт, предназначенным для питания УЗ ванны с пакетными пьезоэлектрическими преобразователями. На передней панели генератора расположены: тумблер включения; кнопки "Пуск" - включения УЗ колебаний и "Стоп" - выключения УЗ колебаний, тумблер "Нагрев". Блок управления (БУ), управляет основными параметрами: временем очистки, температурой растворов, и коммутирует напряжение питания на термостат и таймер. Таймер вырабатывает временные интервалы 1–15 минут и выключает генератор по окончании цикла очистки. Термостат осуществляет терморегулирование раствора в ванне.

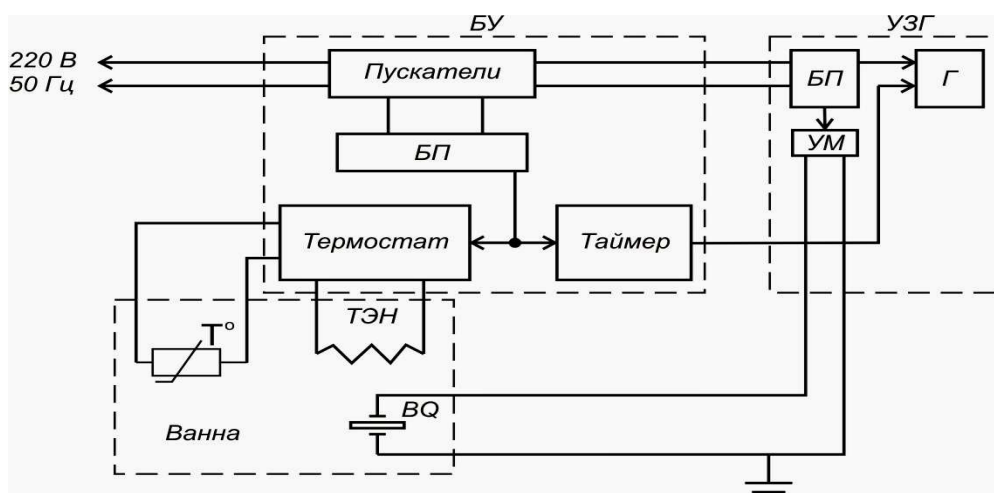


Рис.5.6.Функциональная схема установки УЗ очистки

Датчик давления (рис.5.7) состоит из пьезоэлемента, соединенного с отрезком стального одножильного провода, на который надет кембрик. Датчик помещен в защитный металлический корпус, в котором также расположен предварительный усилитель.

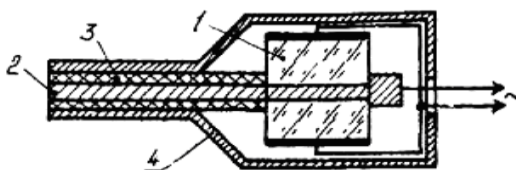


Рис. 5.7. Волноводный датчик давления:  
1 - пьезоэлемент, 2 - демпфер, 3 - кембрик, 4 – корпус

УЗ ванна прямоугольной формы снабжена откидной крышкой. Моющая камера выполнена из нержавеющей стали объемом до 15 литров. Преобразователи конструктивно прикреплены к дну моющей камеры. Моющая камера имеет кран слива. Кавитометр (рис. 5.8) состоит из приемного элемента 1, пьезоэлектрического преобразователя 2, согласующего усилителя 3, аттенюатора 4,

полосового фильтра 5, усилителя 6, детектора 7, усилителя постоянного тока 8, блока питания 9.

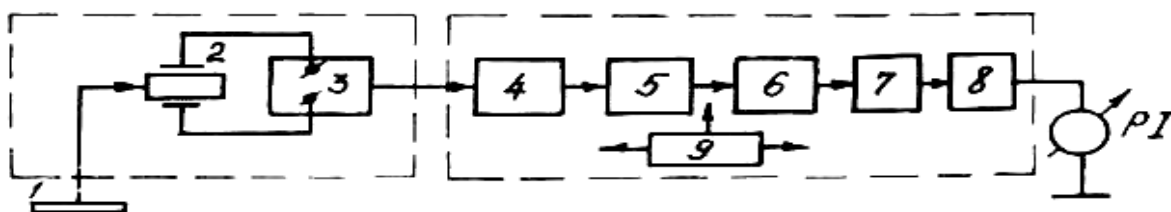


Рис. 5.8. Структурная схема кавитометра

Давление в кавитационной области воспринимается приемным элементом площадью  $0,8 \text{ см}^2$ , соединенным с преобразователем упругим волноводом. Конструктивно приемный элемент, преобразователь и согласующий усилитель выполнен в виде измерительного зонда. Кавитометр измеряет кавитационные давления от 5 до 30 кПа в диапазоне частот 18–50 кГц с точностью  $\pm 10\%$ .

При работе с УЗ технологическим оборудованием соблюдать меры предосторожности в соответствии с ГОСТ 12.1.001-89.

### *Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание к лабораторной работе, инструкции к технологическому УЗ оборудованию и приборам.

2. Рассчитать длину волны колебаний в частотном диапазоне 18–24 кГц через 0,5 кГц, необходимый уровень жидкости в моеющей камере, проверить положение сливного крана (он должен быть закрыт) и заполнить камеру водой до половины расчетного уровня.

3. Поместить в камеру датчик, закрепив его на расстоянии 5–10 мм от дна ванны. Включить тумблера "Сеть" частотомера и кавитометра.

4. Включить тумблером "Сеть" БУ установки УЗ очистки при этом должен загореться индикатор. Установить время очистки на БУ. Подать УЗ колебания на ванну, нажав кнопку "ПУСК". Измерить кавитационное давление в жидкости с помощью кавитометра.

5. Определить неравномерность кавитационного поля в ванне в горизонтальной плоскости с шагом  $\lambda/8$ . Выключить ультразвук, нажав на кнопку "СТОП".

6. Заготовить 10 образцов из алюминиевой фольги размером 60x60 мм. Измерить их начальную емкость  $C_0$  с помощью моста переменного тока Е7-8 или измерителя Е7-20.

7. Определить зону наибольшей кавитационной эрозии путем погружения образцов в ванну на различные расстояния от дна ванны. Опыты начать со дна ванны и вести через 5 мм, включив расстояния, равные  $\lambda/4 \cdot n$ , где  $n = 1, 2, 3, 4$ . УЗ колебания подавать в течение 30–60 с. Измерить емкость образцов после разрушения  $C_p$  и рассчитать интенсивность эрозии

$$I = \frac{C_0 - C_p}{C_p} \cdot 100\%$$

8. Исследовать влияние параметров УЗ-очистки на качество очистки деталей. Включить тумблером “Нагрев” на блоке УЗГ термостат нагрева раствора. При достижении температуры раствора 75°С должен загореться индикатор “Режим”, после чего тумблер “Нагрев” отключить. В соответствии с индивидуальным заданием (табл. 6.1) провести исследование зависимости угла смачивания от параметров УЗ-очистки. Угол смачивания измерять на установке контроля углов смачивания УКУС-Т.

**Таблица 5.1. Индивидуальные задания**

Параметр процесса	Единица измерения	Величина параметра				
		1	2	3	4	5
Выходное напряжение	В	150	100	150	200	250
Температура жидкости	°С	20	30	40	50	60
Время очистки	с	20	30	40	50	60
Расстояние до дна ванны	мм	5	10	15	20	25

9. Выключить УЗ генератор кнопкой “Стоп” и тумблером “Сеть”. Слить мощную жидкость из ванны, убрать рабочее место.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы: структурная макета и УЗ-ванны.
3. Расчет длины волны УЗ-колебаний.
4. Таблицы экспериментальных данных (кавитационное давление, интенсивность эрозии, угол смачивания).
5. Осциллограммы колебаний, эскизы разрушений образцов.
6. Графики полученных зависимостей.
7. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Физические явления при воздействии ультразвука на жидкие среды.
2. Технологические режимы процесса УЗ-очистки.
3. Особенности применяемого технологического оборудования и приборов.
4. Влияние режимов УЗ-очистки на качество очистки и надежность компонентов РЭУ.
4. Методы контроля режимов УЗ-очистки.

## Литература

1.Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: **Учебник/** А.П. Достанко, В.Л. Ланин, А.А. Хмыль, Л.П. Ануфриев .-Минск.: Выш. шк., 2011.- 415 с.

2. Ануфриев Л.П., Ланин В.Л., Хмыль А.А. Коммутационные платы электронной аппаратуры. – Минск: Бестпринт, 2011. –85 с..

3.Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. /**С.П. Кундас, В.Л. Ланин, А.П. Достанко** и др. Т.2– Минск.: Бестпринт, 2011. – 224с.

## 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

# *Учебное издание*

Ланин Владимир Леонидович,  
Хмыль Александр Александрович,

## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

ПО ДИСЦИПЛИНАМ

“ТЕХНОЛОГИЯ РЭС И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ”,  
“ТЕХНОЛОГИЯ РЭС”

для студентов специальностей  
«Проектирование и производство РЭС»  
и «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»  
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. Бровки, 6.