

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

---

# Технология РЭС и ЭВС

Учебное пособие к лабораторным работам

Утверждено  
на заседании редсовета  
26 сентября 2005 г.

Москва  
Издательство МАИ  
2006

УДК 621.396.6 (075)

### Авторы

В.Ф. Борисов (работа 4), М.А. Сахаров (работы 5, 6, 7), Л.М. Федотов (работы 1, 2, 3, 6), Г.В. Филин (работа 1), Ю.В. Чайка (работы 2, 6)

Технология РЭС и ЭВС: Учебное пособие к лабораторным работам по дисциплинам "Технология производства РЭС" и "Технология ЭВС" / В.Ф. Борисов, М.А. Сахаров, Л.М. Федотов и др.; Под ред. доцента, канд. техн. наук Л.М. Федотова. — М.: Изд-во МАИ, 2006. — 90 с.: ил.

В сборнике приведены семь лабораторных работ, тематически охватывающие основные разделы лекций по курсам "Технология РЭС", "Технология ЭВС". Цель лабораторных работ – развить у студентов навыки самостоятельного исследования отдельных технологических задач и закрепить теоретические знания. В описание работ включены сведения, дополняющие и углубляющие лекционный курс. Детальная проработка теоретических вопросов проводится по дополнительной литературе.

Лабораторные занятия знакомят студентов с технологией изготовления отдельных узлов электронной аппаратуры, с методами анализа технологической точности изделий и оценки основных характеристик процессов изготовления, настройки и контроля на разных уровнях конструктивной иерархии РЭС и ЭВС. Все работы выполняются с использованием персональных ЭВМ. Подробная инструкция использования ЭВМ выдаются студентам вместе с заданием на каждую лабораторную работу.

Рецензенты: кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В.А. Шахнов);

канд. техн. наук., доцент Ю.Н. Корниенко

© Московский авиационный институт  
(государственный технический университет), 2006

## **Работа 1. ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР РЭА НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

*Цель работы* – изучить технологические процессы изготовления печатных плат комбинированным позитивным методом и определить пооперационные изменения погрешности процесса формирования проводников и металлизации коммутационных отверстий.

### **Краткие теоретические сведения о конструкторско– технологических решениях коммутации на основе печатных плат.**

Коммутационные структуры РЭА выполняются в виде односторонних (ОПП), двусторонних (ДПП) и многослойных (МПП) печатных плат (ПП) на жестком и гибком основании, а также гибкие печатные кабели (ГПК).

Конструкторско–технологические варианты коммутационных структур приведены на рис. 1.1.

Наименьшие номинальные значения основных размеров элементов конструкции ПП в зависимости от классов точности (табл. 1.1):

$t$  – ширина печатного проводника,

$S$  – расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка;

$b$  – гарантийный поясок;

$\gamma$  – отношение номинального значения диаметра наименьшего из металлизированных отверстий ( $d$ ) к толщине печатной платы ( $H$ ).

Таблица 1.1

| Условное обозначение | Номинальное значение основных размеров для классов точности |      |      |      |       |
|----------------------|-------------------------------------------------------------|------|------|------|-------|
|                      | 1                                                           | 2    | 3    | 4    | 5     |
| $t$ , мм             | 0,75                                                        | 0,45 | 0,25 | 0,15 | 0,10  |
| $S$ , мм             | 0,75                                                        | 0,45 | 0,25 | 0,15 | 0,10  |
| $b$ , мм             | 0,30                                                        | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,025 |
| $\gamma$             | 0,40                                                        | 0,40 | 0,33 | 0,25 | 0,20  |

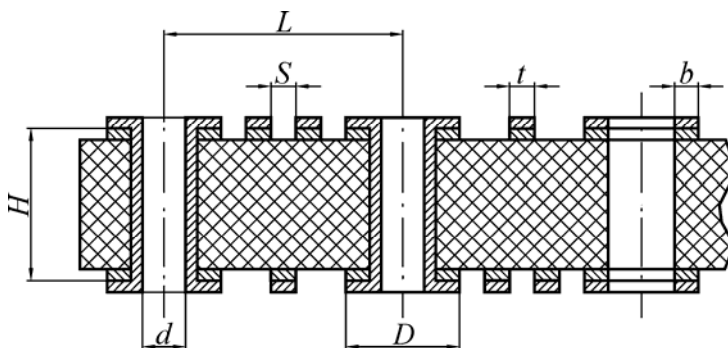


Рис.1.1

*Субтрактивный метод.* В качестве исходного материала используется одно или двухсторонние фольгированные (в основном медью) диэлектрики; после переноса рисунка проводников путем формирования защитной пленки незащищенные участки удаляют с помощью травления.

*Аддитивный метод.* В качестве заготовки используется нефольгированный диэлектрик, на поверхность которого наносится рисунок схемы (химическим или химико-гальваническим способом).

*Полуаддитивный метод.* Используется диэлектрик со сверхтонкой фольгой, которая с минимальной погрешностью (из-за подтравы) травится и, далее, линии рисунка схемы гальванически усиливаются.

Для реализации каждого из классов (табл. 1.1) или одного из конструкторско-технологических решений (рис. 1.1) используется один или комбинация из указанных методов. Так, для изготовления ОПП как правило, используется субтрактивный метод, позволяющий реализовать ПП до 3-го класса точности. ПП высокого, особенно 5-го класса точности, реализуется на основе полуаддитивных методов.

Изучаемый в данной работе типовой процесс изготовления ДПП комбинированным позитивным методом основан на комбинации субтрактивной и аддитивной обработки заготовки ПП.

Подробное пооперационное описание *комбинированного позитивного метода* изготовления ДПП приведено в приложении 1, структурная схема процесса изготовления приведена на рис. 1.2.

Геометрический размер проводящих элементов печатной платы (контактных площадок и проводников) задается при проектировании. Заданная величина воспроизводится на операциях технологического процесса с по-

грешностью, характеризующей точность той или иной операции. Суммарная погрешность является геометрической суммой погрешностей, накапливаемых на отдельных операциях, формирующих рассматриваемый геометрический размер элемента.

Размер чертежа является как бы абсолютно точным размером. Погрешности этого размера возникают при изготовлении фотошаблона, при формировании защитной маски на заготовке печатной платы, при операциях формирования проводника по защитной маски (нанесение химической и гальванической меди, нанесение защитного покрытия олово-свинец, травление меди с пробельных мест).

Погрешности воспроизведения геометрического размера, например ширины проводника, являются характеристиками качества выполнения технологического процесса в целом и составляющих его операций. Анализ технологического процесса предполагает определение случайной и систематической составляющих погрешности ширины проводника, а также сверления и металлизации отверстий на всех операциях их формирования.

Для определения систематической и случайной составляющих погрешности  $j$ -й операции технологического процесса следует измерить значение ширины проводника на  $n$  идентичных по размеру элементах топологического рисунка, расположенных на разных участках заготовок. По измеренным значениям определить среднее значение размера

$$\bar{t}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{ij} ,$$

и среднеквадратичное отклонение (случайную составляющую) размеров  $j$ -й операции по формуле

$$\sigma_{t_j} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_{ij} - \bar{t}_j)^2} ,$$

где  $n$  – количество измерений идентичных по ширине участков рисунка на образцах каждой технологической операции.



Рис.1.2

Для характеристики систематической погрешности при выполнении  $j$ -й операции следует сравнить среднее значение размера элементов топологии в  $j$ -й операции и среднее значение размера элементов топологии в предыдущей  $(j-1)$ -й операции

$$\overline{\Delta t_j} = \bar{t}_j - \bar{t}_{j-1} .$$

Для определения погрешности изготовления фотошаблона в качестве  $\bar{t}_{j-1}$  следует подставлять номинальное значение размера топологического элемента по чертежу. Если номинальный размер неизвестен, допустимо предположить нулевое значение систематической погрешности фотошаблона в силу высокой точности оптических методов его изготовления. Случайная составляющая измеренных по фотошаблону размеров элементов топологического рисунка обусловлена как погрешностями при изготовлении фотошаблона, так и погрешностями измерения размеров с помощью микроскопа.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с описанием прибора для измерения геометрических размеров элементов печатных плат.

2. Распределить представленные образцы по операциям, на которых формируется геометрический размер элемента печатной платы: операции изготовления фотошаблонов, формирования защитной маски, химического и гальванического нанесения меди, нанесения защитного покрытия олово-свинец и при травлении меди с пробельных мест.

3. Выбрать по заданию преподавателя  $n$  проводников, контактных площадок, переходных отверстий или иных элементов топологического рисунка одинаковой ширины, расположенных на разных образцах заготовок. Число  $n$  должно быть не менее 10, количество разных заготовок должно быть максимальным. Допускаются измерения ширины нескольких проводников, расположенных на разных участках одной заготовки.

4. Произвести измерение размера выбранных элементов топологического рисунка и рассчитать систематическую и случайную составляющие погрешности  $j$ -й операции. Методика измерений с помощью микроскопа МБС-2 сводится к следующему. Плату или заготовку поместить на предметный столик микроскопа. Пользуясь механизмом диоптрийной наводки окуляра, добиться резкого изображения окулярной шкалы. Установить увеличе-

ние объектива микроскопа максимальным, но так, чтобы измеряемый топологический элемент целиком помещался в пределах окулярной шкалы (уменьшение увеличения объектива ведет к росту относительной погрешности отсчета размеров по окулярной шкале). Регулировкой фокуса следует добиться одинаково резкого изображения в окуляре краев топологического элемента и делений окулярной шкалы. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

5. Определить систематическую и случайную составляющие погрешностей каждой операции, формирующей геометрические размеры топологических элементов печатной платы. Полученные результаты занести в соответствующие клетки табл. 1.3.

6. Оценить минимальные размеры топологических элементов печатной платы, зазоров между ними и параметров переходных отверстий.

7. Сопоставить полученные в пп. 4...6 результаты с данными табл. 1.1, определить класс точности представленных образцов печатных плат.

8. Оформить отчет по работе.

### Содержание отчета

1. Исходные данные.
2. Описание измерительного микроскопа.
3. Таблица результатов измерений.
4. Таблица результатов расчета погрешностей.
5. Выводы.

Таблица 1.2.

| Номер операции | Объект измерения      | Измеренный размер, мм |   |   |     |          |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---|---|-----|----------|
|                |                       | 1                     | 2 | 3 | ... | <i>n</i> |
| 1              | Фотошаблон            |                       |   |   |     |          |
| 2              | Фоторезистивная маска |                       |   |   |     |          |
| ...            | ...                   |                       |   |   |     |          |
|                |                       |                       |   |   |     |          |



Таблица 1.3.

| Погрешности | Фото-шаблон | Маска на заготовке | Сверление | Металл. отверстий | Гальван. нанесение покрытий | Травление |
|-------------|-------------|--------------------|-----------|-------------------|-----------------------------|-----------|
| $\Delta t$  |             |                    | –         | –                 |                             |           |
| $\sigma_t$  |             |                    | –         | –                 |                             |           |
| $\Delta d$  | –           | –                  |           |                   | –                           | –         |
| $\sigma_d$  | –           | –                  |           |                   | –                           | –         |

### Контрольные вопросы

1. Какова природа возникновения систематической и случайной составляющих погрешности?
2. Как обеспечить исключение систематической погрешности при формировании ширины проводников?
3. Чем объяснить разные знаки систематической погрешности, возникающей на различных операциях ТП?
4. Какие технологические мероприятия могут привести к снижению случайной составляющей погрешности?
5. После каких операций взяты экспериментальные образцы ТП?

### Приложение 1

#### *Типовой ТП изготовления ДПП комбинированным позитивным методом.*

*Исходные заготовки* ПП изготавливают из фольгированных диэлектриков.

Выпускаемые в нашей стране диэлектрики изготавливаются на основе эпоксифенольной смолы, а в США – эпоксидной смолы. В отечественных стеклотекстолитах смолы содержится 40%, а в американских – 60%.

Наиболее широко используют стеклотекстолит фольгированный двухсторонний марок СФ-2-35, СФ-2-50.

Последовательность операций (схема ТП) изготовления ПП комбинированным позитивным методом приведена на рис. 1.2.

**1. Изготовление заготовок.** К заготовительным операциям относят раскрой заготовок и разрезку материала.

Размер заготовок определяется их габаритами и технологическими допусками. По периметру заготовок оставляют технологическое поле для размещения базовых отверстий и тестовых структур. Ширина технологического поля для ДПП составляет 15 мм, а для МПП 20...30 мм. Раскрой должен предусматривать минимальный отход материала.

**2. Выполнение базовых отверстий.** Расположение базовых (технологических) отверстий на заготовках должно соответствовать расположению их на фотошаблонах. Эти отверстия служат направляющими для захвата плат инструментом при изготовлении коммутаций и при монтаже узлов. По стандартам США допуск на диаметр задается  $(-0,001 + 0,0762 \text{ мм})$ .

**3. Сверление отверстий.** Сверление стеклопластиков производится твердосплавным инструментом. Для повышения производительности и качества сверления в ПП из стеклопластика применяются сверла из твердого сплава, например ВК6М или ВК80М. Применение сверл из твердого сплава позволяет вести сверление отверстий при повышенной скорости резания. Сверла, как правило, требуют повторной заточки после сверления 1500...3000 отверстий.

Для проверки качества сверления производят пробное сверление 10...20 отверстий на технологическом поле ПП (тест-купон).

**4. Подготовка поверхности заготовок фольгированного диэлектрика.** Качество подготовки поверхности фольги и диэлектрика влияет на адгезию при нанесении фоторезиста и при осаждении металла.

В отечественной промышленности широко используются химические и механические способы подготовки, а также их сочетание.

Механическая подготовка сводится к обработке поверхности смесью маршаллита с полировальной известью, промывки водой и декапированием. Обработка ведется на зачистных машинах типа «Реско-635», «Билко» и др.

Химическая подготовка осуществляется обезжириванием, декапированием – подтравливанием в растворе хромового ангидрида или персульфата аммония.

**5. Химическое меднение.** Операция химического меднения – одна из трудоемких и сложных. На ее долю приходится 20...40% брака. Предпочтительное использование химически осажденной меди в технологии изготов-

ления ПП при металлизации полимеров, обусловлена тем, что медь более эластична по сравнению с никелем, и нанесение ее чаще осуществляется при комнатной температуре.

При химическом осаждении обеспечивается высокая равномерность покрытия и хорошая адгезия, что выгодно отличает этот процесс от электрохимического. Однако скорость роста пленки мала, поэтому химическим осаждением формируют лишь тонкий сплошной слой, необходимый для последующего усиления гальваническим осаждением меди.

Обработку во всех растворах производить с покачиванием или вибрацией заготовок. В современных установках используется ультразвук для усиления циркуляции раствора и с целью улучшения смачивания отверстий малого диаметра ( $\gamma=0,2\dots0,3$ ).

- *Обезжиривание* заготовки ПП – до 2 мин. при 30...40°C моющим веществом «Прогресс» или раствором порошка «Лотос» концентрацией до 5 г/л при 18...25°C.

- *Промывка* проточной водопроводной водой.

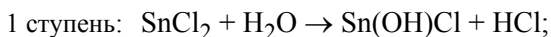
- *Декапирование* соляной кислотой при 18...25°C в течение до 5 с.

- *Промывка* проточной водопроводной водой.

- *Сенсибилизация* поверхности заготовок при 18-25°C в течение до 5 мин. двухлористым оловом (50 г/л).

Чтобы придать диэлектрику способность к металлизации, проводят две подготовительные операции – сенсибилизацию и активацию.

Цель операции сенсибилизации – создать на поверхности диэлектрика условий для образования пленки из ионов палладия. Обработанная в растворе двухлористого олова плата промывается в воде, при этом происходит гидролиз соли по схеме:



- *Промывка* проточной и дистиллированной водой.

- *Активация* 3...5 мин. при 18...25°C.

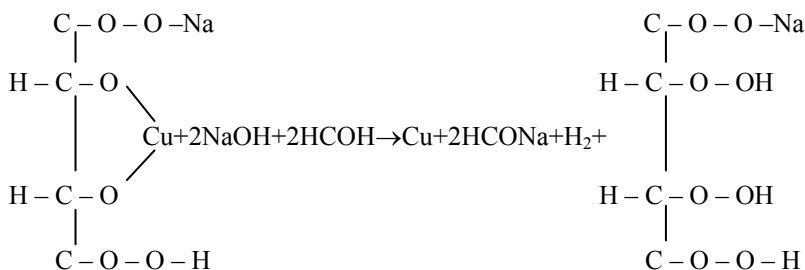
Так как в солянокислых растворах хлористый палладий находится в виде соединения  $\text{H}_2\text{PdCl}_4$ , то реакция активации может быть представлена в виде уравнений:



- *Промывка* в сборнике два раза 0,5...1 мин. при 18...25°C.

В современных производствах операции сенсibilизации и активации производят в одном растворе – совмещенном активаторе.

• *Химическое меднение* относится к классу окислительно-восстановительных реакций. Формируется слой не более 3 мкм. Процесс протекает лишь при наличии на поверхности, подлежащей металлизации, катализатора. Процесс взаимодействия тартрата меди с формалином в присутствии палладиевого катализатора схематически описывается:



- *Промывка* проточной водой.

**6. Предварительное гальваническое меднение.** Аморфный слой химической меди весьма быстро окисляется на воздухе и поэтому должен быть сразу (желательно до высыхания заготовки) усилен гальваническим меднением (затяжка) на толщину 5...7 мкм.

## 7. Нанесение рисунка схем.

Используются фотолитографические процессы, в основе которых лежат фоторезисты – светочувствительные и устойчивые к воздействию агрессивных сред композиции, изменяющие свою растворимость при облучении. Основное назначение фоторезистов – создание защитного рельефа требуемой конфигурации.

Фоторезисты должны иметь: высокую светочувствительность; достаточную разрешающую способность, которая определяется числом передаваемых линий на 1 мм; однородный по всей поверхности (беспористый и стабильный по времени) слой с высокой адгезией к материалу подложки;

резкую и четкую границу между участками, защищенными и незащищенными фоторезистом; устойчивость к физическим воздействиям; надежность.

В технологии ПП используются в основном сухие фоторезисты.

Сухие пленочные фоторезисты (СПФ) производят в виде пленки толщиной 20, 40 или 60 мкм, полимеризующейся под воздействием ультрафиолетового излучения, заключенной между защитной полиэтиленовой пленкой, удаляемой в процессе нанесения СПФ на плату, и оптически прозрачной пленкой полиэтилентерефталата (лавсан), удаляемой с поверхности перед проявлением СПФ.

- *Нанесение фоторезиста* на поверхность платы.

Фоторезист наносят на подготовленную поверхность (операция. 4) платы, нагретой до температуры 50—60°C, на валковых ламинаторах при нагреве пленки фоторезиста валками до 105—120°C под давлением, которое можно регулировать.

- *Экспонирование.*

Фотошаблон накладывают на поверхность платы, при этом изображение базовых отверстий фотошаблонов совмещают с базовыми отверстиями платы (на технологических полях). Фотошаблон должен плотно прилегать ко всей поверхности платы. Экспонирование рисунка производят ультрафиолетовым излучением на установке экспонирования. При экспонировании происходит полимеризация фотополимера, расположенного под прозрачными участками фотошаблона, что делает эти участки нерастворимыми в проявителе.

- *Выдержка* в темноте не менее 30 мин.

В процессе выдержки происходит дополимеризация фотополимера.

- *Удаление лавсановой пленки и проявление* рисунка на специальной конвейерной установке.

## 8. Гальваническое меднение.

Металлизация отверстий на ПП выполняется медью и должна отвечать требованиям: наличие сплошной металлизации; одинаковая толщина покрытия в отверстиях и на поверхности фольги; мелкозернистая структура покрытия; отсутствие утолщений, включений, избыточного нарастания металла на выходе отверстия или на внешнем крае контактной площадки; отсутствие трещин в покрытии.

Минимальная толщина меди в отверстиях должна составлять 25...30 мкм при ее пластичности не менее 6%.

- *Зачистка* поверхности заготовок полировальной известью.
- *Промывка* проточной водопроводной водой.
- *Декапирование* в соляной кислоте при 18...25°C, 5...10 мин.
- *Промывка* проточной водопроводной водой 1...2 мин.
- *Гальваническое меднение* заготовок при 18...25°C до достижения толщины меди в отверстиях не менее 25 мкм.

- *Промывка* проточной водопроводной водой 2...3 мин.
- *Промывка* горячей проточной водой 40...50°C, 0,5...1 мин.
- *Сушка* при 18...25°C до высыхания.
- *Визуальный контроль* качества рисунка схемы и оценка толщины слоя меди.

• *Ретушь* рисунка схемы (наросты гальванической меди удаляются скальпелем).

#### **9. Гальваническое нанесение покрытия олово-свинец.**

- *Зачистка* поверхности заготовок полировальной известью.
- *Промывка* проточной водопроводной водой.
- *Декапирование* 18-25°C, 3...5 с.

Сплав олово-свинец (ОС) (61% олова, 39% свинца) наносится на ПП в качестве металлорезиста при травлении, для защиты проводников и обеспечения пайки элементов.

Для совместного выделения на катоде двух металлов необходимо достижение потенциала, достаточного для выделения каждого из них. Потенциалы олова и свинца в борфтористоводородных растворах столь близки, что совместное выделение их на катоде возможно при самых низких значениях плотности тока. В этом электролите олово является менее благородным металлом.

- *Промывка* в сборнике два раза при 18...25°C по 15...30 с.
- *Промывка* проточной водопроводной водой.
- *Промывка* горячей проточной водой при 50...60°C, 1...2 мин.
- *Сушка* при 50...60°C до высыхания.
- *Контроль* качества и толщины покрытия.

#### **10. Удаление слоя фоторезиста.**

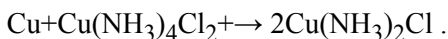
- *Удаление защитного слоя* (раздублирование) с использованием едкого натра при 70...80°C, 3...5 мин.

- *Промывка* горячей проточной водой 1...2 мин. при 50...60°C.
- *Промывка* проточной водопроводной водой.
- *Сушка* при 50...60°C.
- *Ретушь* рисунка схемы.

### 11. Травление меди.

Травление меди – важнейшая технологическая операция, определяющая качество печатных проводников. Брак, допущенный при выполнении этой операции, практически не может быть исправлен. Типичные виды брака: значительное подтравление (больше чем на 1/3 ширины проводника) и нарушение целостности проводников в результате перетравления. Травление меди – сложный окислительно–восстановительный процесс, в котором окислителем является травильный раствор, переводящий медь из металлического состояния в ионное.

- *Травление меди с пробельных мест*, например:



Процесс травления проводится 3...5 мин. при 30...40°C.

- *Сушка* при 35...45°C до высыхания.
- *Удаление ретуши*.

Лак АВ-4 удаляют механически шпателем, асфальтобитумный лак БТ-577 смывают скипидаром.

### 12. Осветление поверхности покрытия.

- *Осветление* в растворе на основе тиомочевины. Проводится сразу после травления при 18...25°C, 1...2 мин.
- *Промывка* проточной водопроводной водой.
- *Промывка* горячей проточной водой при 50...60°C.
- *Сушка*.
- *Контроль* качества покрытия и чистоты отмывки ПП.

### 13. Оплавление покрытия олово-свинец.

Гальваническое покрытие олово-свинец достаточно хрупкое и при нависании над проводниками (фактор подтравливания) может обламываться, вызывая короткие замыкания между проводниками. Кроме того, кристаллическое покрытие быстро окисляется на воздухе и теряет свойство паяемости.

Для устранения этих недостатков покрытие подвергают оплавлению путем нагрева инфракрасным излучением в конвейерных установках. В ре-

зультате оплавления олово-свинец за счет сил поверхностного натяжения стягивается в пределах меди рисунка и переходит в металлургическое состояние, что значительно увеличивает возможный срок пролеживания плат до пайки (более 1 года).

**14. Обработка контура ПП и сверление крепежных отверстий** до конструкционных размеров

**15. Маркировка.** Выполняется в соответствии с ОСТ4.ГО.028.001.

**16. Контроль** (проверка качества ПП).

**17. Нанесение технологического защитного покрытия.**

Необходима особая тщательность подготовки поверхности перед нанесением покрытия, так как от этого в значительной степени зависит качество ПП (сопротивление изоляции, сохранение паяемости и др.):

- *Зачистка* поверхности ПП полировальной извесьтю.
- *Промывка* проточной водопроводной водой.
- *Декапирование* 3...5 с.при 18...25°C.
- *Промывка* проточной водопроводной водой.
- *Декапирование* при 18...25°C 3...5 с.; серная кислота не должна содержать ионов хлора.
- *Промывка* проточной водой.
- *Промывка* проточной горячей водой при 50...60°C.
- *Промывка* деионизированной водой при 18...25°C последовательно в двух ваннах. Рекомендуется использовать ультразвук или вибратор.
- *Сушка* при 80...90°C, 2...3 часа.
- *Контроль* чистоты промывки ПП:

Производится выборочный контроль по сопротивлению изоляции 2...3% партии одновременно изготовленных плат, но не менее трех. При получении заниженных результатов, выполняется повторная промывка и сушка.

После проведения испытания на чистоту промывки платы сушить.

- *Нанесение* технологического защитного покрытия.

Производится окунанием в раствор канифоли и ацетона не позднее чем через 3 часа после сушки. Допускается нанесение покрытия пульверизатором.



Рекомендуется удалять технологическое защитное покрытие после сборки блоков непосредственно перед нанесением влагозащитного покрытия во избежание снижения сопротивления изоляции ПП в результате касания руками в процессе сборки.

- Сушка 20...30 мин. при 18...25°C.
- Сушка при 70...80°C

#### **18. Упаковка.**

### **Библиографический список**

1. Федулова А.А.. Технология многослойных печатных плат. – М.: Радио и связь, 1990.
2. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. / И.П.Бушминский, О.Ш.Даутов, А.П. Достанко и др. – М.: Радио и связь, 1989.

## **Работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЭА**

*Цель работы* – ознакомить студентов с основами исследования точности и стабильности технологических процессов изготовления МЭА.

### **Общие теоретические сведения**

Для современного развития микроэлектроники характерна повышенная сложность и многооперационность технологических процессов (ТП) изготовления микроэлектронной аппаратуры (МЭА). Это ведёт к необходимости учёта большого числа управляемых и неуправляемых технологических факторов и определяет вероятностный характер оценки параметров качества ТП, важнейшими из которых являются точность и стабильность.

Под точностью понимается свойство ТП обеспечивать соответствие поля рассеяния значений показателя качества изготавливаемого изделия заданному полю допуска и его расположению.

Под стабильностью понимается изменение точности ТП во времени.

Использование для объективной оценки точности ТП коэффициента выхода годных недостаточно эффективно, несмотря на простоту его определения, в силу интегральности этой характеристики, которая зависит не только от технологических факторов, связанных с поддержанием режима работы оборудования, качеством материалов и полуфабрикатов, и конструкторских факторов, определяемых, например, геометрией элементов, но и от величины допусков на выходные параметры. Коэффициент выхода годных также зависит от культуры производства, его освоенности, технологической дисциплины и т.д.

Для повышения объективности оценки точности ТП изготовления МЭА проводится его аттестация на основе специальных тестовых структур, с помощью которых устанавливается предельная погрешность в изготовлении МЭА, определяющая потенциальную точность ТП  $\delta_{\text{п}}$ , при условии обеспечения требуемых значений коэффициента выхода годного и надёжности изделий.

Потенциальная точность позволяет решить вопрос об использовании аттестованного ТП для изготовления конкретной МЭА, которая, в свою очередь, характеризуется функциональной точностью.

Функциональная точность обеспечивает точность выходных параметров МЭА в соответствии с техническими условиями (ТУ), в которых приводятся численные значения полей допуска  $\delta_{\text{ТУ}}$  на каждый параметр.

$\delta_{\text{ТУ}}$  и  $\delta_{\text{П}}$  сопоставляются на стадии оценки возможности реализации принятого схмотехнического решения при выборе одного из существующих типовых ТП.

В конкретных условиях производства формируется технологическая точность, определяемая производственными погрешностями, которые образуют результирующее поле отклонений рассматриваемого выходного параметра изготавливаемого изделия  $\delta_{\text{Т}}$ . Поэтому потенциальную точность можно рассматривать как предельно реализуемую технологическую точность. С другой стороны, технологическая точность не должна быть меньше точности, регламентируемой ТУ, и соотношение между представленными характеристиками можно выразить в виде

$$\sigma_{\text{ТУ}} \geq \sigma_{\text{Т}} \geq \sigma_{\text{П}}. \quad (2.1)$$

При анализе точности ТП изготовления конкретного изделия в выбранных условиях производства мы получаем информацию о  $\delta_{\text{Т}}$ . В статистическом отношении задача сводится к нахождению параметра закона распределения погрешности и сопоставлению полученного поля с допуском по ТУ.

Однократная статистическая выборка может использоваться для оценки точности при условии неизменности во времени производственных и внешних факторов.

Для анализа стабильности ТП могут служить наблюдения, охватывающие достаточный промежуток времени (сутки, смену), составленные из последовательных проб, отобранных через определённые фиксированные промежутки времени.

При выборе числа замеров в пробе возникают противоречия: для достоверного суждения о состоянии процесса число замеров должно быть достаточно большим, но при этом возможны изменения ТП за время проведения статистического эксперимента. Слишком малое число замеров недостоверно. Интервалы между выборками или пробами устанавливаются в зависимости от наблюдающейся на практике частоты разладок ТП. Важно, чтобы число замеров  $n$  в пробе оставалось постоянным. Теория статистического контроля качества рекомендует нечётное число [2]. В нашем случае считаем  $n = 7$ .

Обработывая материал в каждой пробе, можно определить смещение центра настройки и изменение рассеивания. Для анализа стабильности ТП используются контрольные точечные и точностные диаграммы и диаграммы доверительных интервалов, приведённые на рис.2.1 и 2.2.

На всех диаграммах по оси абсцисс откладываются номера проб и время проведения замеров. На точечные и точностные контрольные диаграммы наносятся три линии, соответствующие номинальному  $N_y$ , верхнему  $y_B$  и нижнему  $y_H$  значениям контролируемого параметра, заданным в ТУ на аппаратуру.

На точечных диаграммах (рис.2.1,*а*) по оси ординат отложены индивидуальные или средние по пробам значения исследуемого параметра. Через крайние точки в пределах пробы проводят верхнюю и нижнюю линии, а между ними – среднюю линию, по которой судят приблизительно о поведении ТП во времени. Изменение размаха варьирования от пробы к пробе позволяет грубо судить об изменении рассеивания по времени.

На точностных диаграммах по оси ординат откладывают средние арифметические значения параметра, среднеквадратические отклонения и крайние значения в пробе. Направление полученных таким образом полос (рис.2.1,*б*) позволяет с большей надёжностью, чем в случае точечной диаграммы, судить о стабильности.

Решение о необходимости регулирования принимается при достижении значений контролируемого параметра некоторых контрольных уровней  $y_{BK}$  и  $y_{HK}$  (рис.2.1,*б*), которые сигнализируют о нестабильности ТП. Для исключения появления брака необходимо, чтобы

$$y_B > y_{BK}, \quad y_{HK} > y_H .$$

Минимальное или среднее значения временного интервала между двумя разладками характеризуют стабильность процесса.

Контрольные уровни устанавливаются из соотношений

$$y_{BK} = N_y + t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} ;$$

$$y_{HK} = N_y - t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} ,$$

где  $\sigma^2$  – заданная дисперсия;  $t$  – коэффициент, характеризующий уровень доверительной вероятности (устанавливается в зависимости от степени «жёсткости» контроля и может принимать значение  $t_{0,0027} = 3$ ,  $t_{0,01} = 2,576$ ,  $t_{0,05} = 1,96$ ).

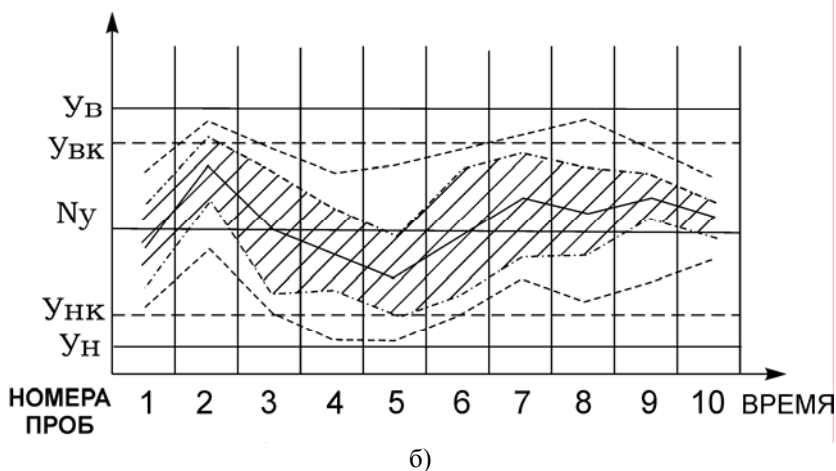
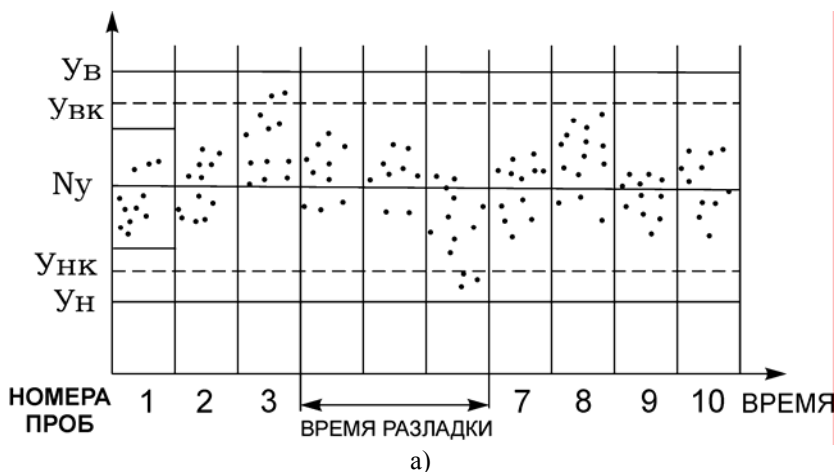


Рис.2.1. Контрольные диаграммы для оценки стабильности ТП:  
а – точечные; б – точностные

Но все же суждения, основанные на точечных и точностных диаграммах, остаются довольно грубыми, так как эмпирические характеристики (средние и дисперсии) подвержены случайными колебаниями.

Более определенное суждение об изменении центра и параметра рассеивания можно сделать по диаграмме доверительных интервалов, где по осям ординат отложены средние по пробам и отрезки (рис.2.2), равные эмпирическим средним квадратическим отклонениям.

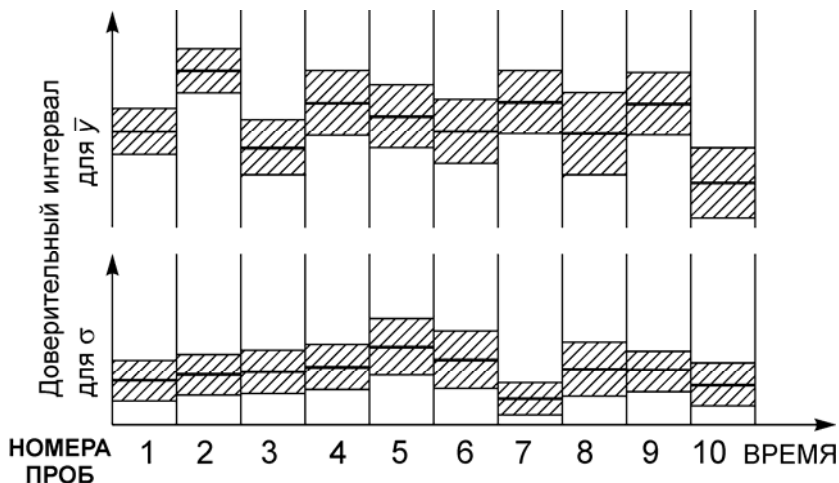


Рис. 2.2. Диаграммы доверительных интервалов

Кроме того, на диаграмму наносятся доверительные границы для центра и для среднего квадратического отклонения. В тех точках, где смежные доверительные интервалы не перекрываются, можно с достаточным основанием судить о наличии изменения центра настройки или рассеивания а, следовательно, о стабильности ТП.

### Методика исследования точности ТП

1. Получив с вариантом задания число  $n$  и измерив контролируемый параметр изделия, вычислив  $S_y$  в соответствии с п.2, определить погрешность оценки.
2. Закон распределения (поле рассеивания) погрешности определяется на основе статистического анализа и построения гистограмм распределения.

Для статистического анализа используется персональная ЭВМ в диалоговом режиме:

2.1. Вводится массив экспериментальных данных и формируется гистограмма.

2.2. Рассчитывается среднее значение и среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра  $\bar{y}$  и  $S_y$ .

2.3. Рассчитывается коэффициент относительной асимметрии  $\alpha_i = \frac{\bar{y} - N_y}{\delta_{Ty}}$ .

Необходимость учета величины  $\alpha_i$  определяется с помощью критерия Стьюдента:

$$\bar{y} - N_y \leq \frac{t\sigma}{\sqrt{n}},$$

где  $t$  – коэффициент, характеризующий уровень доверительной вероятности оценки (обычно  $t=3$ ).

Соблюдение критерия Стьюдента позволяет считать  $\alpha_i = 0$ .

2.4. Рассчитывается коэффициент относительного рассеивания

$$k_i = \frac{3S_y}{\delta_{Ty}}.$$

Учет величины  $k_i$  ведется на основании критерия Фишера:

$$\Theta \leq F,$$

где  $\Theta$  – расчетное значение, вычисляемое по формуле

$$\Theta = \frac{S_y^2}{\sigma^2} \quad \text{при} \quad S_y^2 > \sigma^2,$$

$F$  – граничное распределение критерия Фишера, которое задается преподавателем исходя из правил определения в зависимости от степеней свободы, например из [1]. При удовлетворении критерия Фишера  $k_i=1$ .

3. Вероятность попадания показателя качества в пределы допуска рассчитывается по формуле

$$P(y_{\text{н}} < y < y_{\text{в}}) = \Phi \left[ \left( \frac{y_{\text{в}} - N_y}{\sigma} \right) \left( \frac{1 - \alpha_i}{k_i} \right) \right] - \Phi \left[ \left( \frac{y_{\text{н}} - N_y}{\sigma} \right) \left( \frac{1 - \alpha_i}{k_i} \right) \right],$$

где  $\Phi$  - функция распределения.

4. Сравниваются  $P$  с  $P_{\text{доп}}$  ( $P \leq P_{\text{доп}}$ ).

### Методика исследования стабильности ТП

1. По представленным в соответствии с вариантом задания значениям контролируемого параметра рассчитать с использованием ЭВМ статистические характеристики мер положения и мер рассеивания по пробам.

2. По полученным или заданным  $y_{\text{вк}}$  и  $y_{\text{нк}}$  построить точечную и точностную диаграммы.

Сделать заключение о стабильности ТП.

3. Построить диаграмму доверительных интервалов для средних значений по пробам по формуле

$$\bar{y}_{\text{вн}} = \bar{y} \pm t \frac{S}{\sqrt{n}},$$

где  $S^2$  - дисперсия в пробе по экспериментальным данным.

Построить диаграмму доверительных интервалов для среднеквадратических отклонений по формуле

$$\sigma_{\text{вн}} = \sigma \pm t \frac{S}{\sqrt{2n}},$$

где  $n$  - число измерений в пробе.

### Задание

1. Получить исходные данные для оценки точности и стабильности у преподавателя и лаборанта.

2. Рассчитать статистические характеристики.

3. Оценить точность ТП.

4. На основе полученных у преподавателя статистических данных по отдельным пробам провести анализ стабильности с использованием точечной и точностной диаграмм доверительных интервалов.



5. Сделать вывод о стабильности ТП на основе характеристики времени разладки.

### **Содержание отчёта**

1. Исходные данные.
2. Расчетные формулы с подробными пояснениями входящих в них составляющих.
3. Гистограмма распределения контролируемого параметра.
4. Выводы по результатам оценки точности ТП.
5. Точечная и точностная диаграммы.
6. Диаграмма доверительных интервалов.
7. Выводы по результатам оценки стабильности ТП.

### **Контрольные вопросы**

1. Дать понятия точности и стабильности ТП.
2. При каких условиях потенциальная точность ТП совпадает по значению с технологической точностью?
3. В каких случаях появляется необходимость в сопоставлении потенциальной и технологической точности ТП?
4. Каким образом оценивается точность ТП?
5. Как оценивается стабильность ТП с помощью точечных и точностных диаграмм?
6. Как оценивается стабильность с помощью диаграмм доверительных интервалов?
7. Достоинства и недостатки исследуемых в работе методов оценки стабильности ТП?

### **Библиографический список**

1. Сахаров М.А. Сборник практических занятий по технологии РЭА. – М.: МАИ, 1982.
2. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. – М.: Мир, 1970. – С. 260-292.

### **Работа 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ПОДГОНКА ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИС**

*Цель работы* – ознакомить студентов с существующими разновидностями подгонки резисторов ГИС, научить обоснованному выбору метода обеспечения требуемой точности элементов, а также экспериментально исследовать некоторые из методов.

#### **Общие теоретические сведения**

Подгонка является одним из средств обеспечения требуемой функциональной точности изготовления МЭА и сводиться к изменению номиналов пленочных элементов до требуемых значений для выполнения заданных функций.

Технологическая погрешность  $\sigma_{\text{вых}}$  определяется невоспроизводимостью геометрических размеров контуров элемента ГИС и электрофизических свойств пленки.

Для обеспечения требуемой точности номинал конденсатора изменяют довольно редко, поэтому в дальнейшем будут обсуждены вопросы подгонки только резисторов.

Погрешность геометрических размеров пленочных элементов определяется точностью изготовления масок и фотошаблонов: разрешающей способностью способа формирования конфигурации элементов и точностью совмещения слоев, а также качеством формирования конфигурации элементов. Причем среди геометрических погрешностей существуют случайные и систематические. Систематические, такие, как погрешности и подпылы, можно учесть в процессе производства и произвести соответствующую коррекцию на этапе изготовления фотошаблонов.

Невоспроизводимость электрических свойств резистивных пленок, в первую очередь сопротивление квадрата пленок  $\rho_{\square}$ , определяется следующими причинами:

- разницей  $\rho_{\square}$  контрольного образца и его среднего значения на рабочей подложке;
- разбросом значений  $\rho_{\square}$  в пределах одной подложки;

- изменением среднего значения  $R_{\square}$  в пределах партии подложек, одновременно обрабатываемых за один технологический цикл.

Погрешности, определяющие свойства пленки, могут носить случайный характер, когда они вызваны локальными дефектами пленок и подложек, или систематический из-за групповых методов изготовления, обусловленных диаграммой конденсации (отношением площадей зон с одинаковыми параметрами).

Подгонка вызвана необходимостью обеспечения экономичности производства резисторов, точность которых после получения пленочных структур и рисунка составляет 75...25%.

Операция подгонки в общем случае используется для ГИС общего применения, СВЧ-диапазона, мощных и прецизионных. Наибольшие требования к операции подгонки предъявляют при изготовлении прецизионных схем, где требуемая точность может достигать 0,01%. Заметим, что совершенствование методов подгонки привело к существенному распространению толстопленочных (на основе вжигания паст на керамическую подложку) ГИС для создания схем разнообразного назначения.

Подгонка может проводиться как в процессе изготовления резистивных элементов микросхем (технологическая подгонка), так и на этапе регулировки и настройки отдельных частей аппаратуры, в состав которой входят пленочные микросхемы (функциональная подгонка).

С целью упрощения регулировки аппаратуры операции подгонки целесообразно проводить после изготовления и сборки элементов, чтобы изменением номинала одного элемента скомпенсировать отклонения, вызываемые всеми предыдущими операциями. К этому сводится функциональная подгонка, когда изменением параметров одного или нескольких пленочных элементов обеспечивается попадание в поле допуска выходного параметра всего функционального узла или устройства. Достоинством этих методов является минимальное время подгонки и возможность использования дискретных компонентов с менее жесткими допусками; недостатком - необходимость работы со схемой с подключенным питанием, существенное понижение степени интеграции и использование довольно сложного и дорогостоящего оборудования.

**Методы подгонки резистивных элементов.** Номинальное значение сопротивления пленочного резистора определяется соотношением

$$R = \rho_{\square} \cdot N = \rho_{\square} \frac{l}{a},$$

где  $R$  - номинальное значение, Ом;  $\rho_{\square}$  - удельное поверхностное сопротивление, Ом/ $\square$ ;  $N$  – коэффициент формы (число квадратов) резистора;  $l$  - длина резистора ;  $a$  - ширина резистора.

Следовательно, номинал резистора можно варьировать изменением его геометрических размеров или удельного сопротивления. Первый способ не требует дополнительных пояснений. В свою очередь,  $\rho_{\square}$  пленки определяется ее толщиной, структурой и составом. Отсюда вытекают возможные методы подгонки резисторов и их место в производстве ГИС.

Известны различные методы подгонки, которые сводятся к изменению геометрии и изменению состава и структуры материала резистора.

Строго говоря, подгонка приводит к комбинированному изменению как структуры, так и геометрии. Тем не менее, деление на две группы удобно для практики. К первой группе можно отнести: механический (фрезерование, скрабирование), ультразвуковой, воздушно-абразивный, электроискровой, лазерный, электронно-лучевой и метод с использованием перемычек и секций; ко второй группе – термический отжиг, электрический нагрев пропусканием тока, электрохимический метод и метод уплотнения.

Целью методов подгонки первой группы является изменение сопротивления за счет изменения длины, ширины или формы пленочного резистора.

Подгонка механическими скрайбированием или фрезерованием требует несложного оборудования, состоящего из алмазного резца или фрезы с приводом, координатного стола для перемещения резистора при подгонке и блока измерения (рис.3.1,а). Ультразвуковой метод подгонки основан на том, что механическое воздействие резца на пленку может передаваться посредством ультразвуковых колебаний.

При абразивной подгонке снимают часть резистивного материала с помощью выбрасываемых потоком воздуха мелких (20мкм) абразивных частиц, которые разрушают небольшие участки пленки резистора до тех пор, пока сопротивление не увеличивается до требуемой величины. Недостатками метода являются возможность повреждения близлежащих деталей схемы, нарушение их защитного слоя, и, как следствие этого, ограниченная плотность размещения элементов. В случае обработки резистора излишним количеством абразивного порошка его поверхность становится шероховатой

и характеристики ухудшаются. Трудно обрабатывать пленки из твердых материалов.

Электроискровая подгонка основана на локальном нагреве пленки, находящейся в контакте с острием зонда, до ее испарения или окислирования (рис 3.1,б). Недостатком является низкая производительность из-за быстрого износа иглы и зонда и значительная погрешность геометрических размеров.

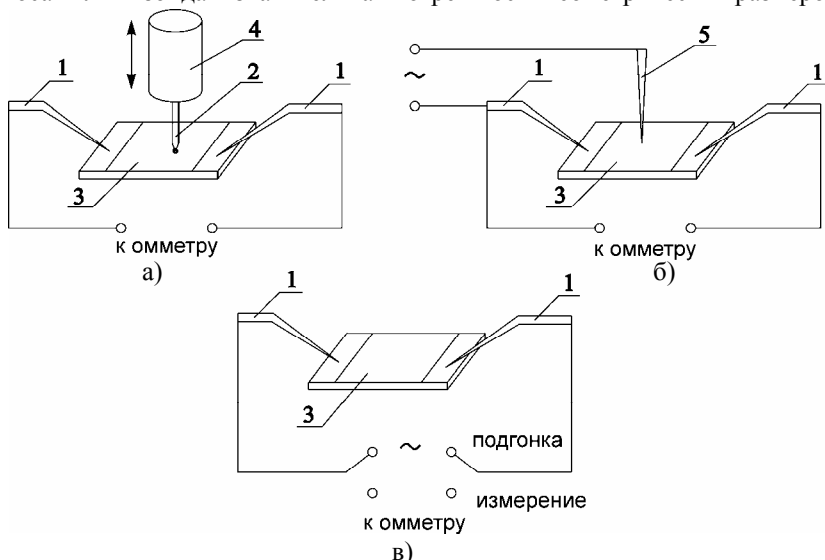


Рис.3.1. Схемы подгонок

а – механическая; б – электроискровая; в – токовая

Лазерная и электронно-лучевая обработка относятся к бесконтактным методам подгонки. Лазерная обработка тонких пленок сопровождается высокими скоростями локального нагрева (до  $10^{10}$  град/с) до испарения материала пленки. Высокая плотность импульсной световой энергии (до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>) при малой длительности ( $\tau=10^{-8}$  с) и высокая скорость охлаждения (до  $10^8$  град/с) обеспечивают быстрое испарение при минимальном нагреве материала вне границ области резания. Возможно использование лазера для термообработки материала резистора при пониженной (до  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup>) плотности энергии, что приводит к уменьшению сопротивления из-за нагревания материала до температур, вызывающих уплотнение кри-

сталлической структуры. Таким образом, лазерная подгонка позволяет как увеличивать, так и уменьшать сопротивление резисторов.

Частичное удаление пленки резистора возможно с помощью электронного луча с удельной мощностью  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Недостатком этого метода является сложность, дороговизна и громоздкость оборудования, связанная с необходимостью обеспечения высокого вакуума. Достоинством - самая высокая из существующих методов скорость реза и электромагнитное сканирование луча.

При лазерной подгонке применяются поперечный, двойной поперечный, Г-образный и серпантинный резы. Вид реза определяется конфигурацией и площадью резистора, типом резистивного материала и требуемой точности подгонки. Наибольшее распространение получил в последнее время рез в виде серпантинной дорожки. Серпантинная подгонка дает возможность реализовать из одинаковых пленок резисторы различных номиналов. Тем самым для толстопленочных технологий уменьшается количество трафаретов, нанесений и вжиганий.

Методы, использующие перемычки и секции резисторов, обеспечивают дискретную подгонку. Достоинством метода является относительная простота оборудования, используемого при подпайке и приварке дополнительных секций или при резке перемычек. Недостатком является существенное уменьшение степени интеграции за счет дополнительных подстроечных секций.

Подгонку можно проводить изменением структуры пленки. Структура пленки определяется технологическими факторами формирования пленки (температурой подложки и микрорельефом ее поверхности, давлением и составом остаточных газов, скоростью формирования потока и его осаждения на подложку и др.). Однако структурой пленки можно управлять и после формирования пленки путем ее уплотнения, отжига дефектов, изменения фазового состава. Это достигается в результате физического воздействия на пленку без механического ее разрушения, а также за счет терморегулирующего отжига при высоких температурах.

Использование явления упорядочения структуры и изменение размеров кристаллов тонких резистивных пленок при воздействии относительно высоких температур (до 600°C) положено в основу терморегулирующего отжига. Термический отжиг, позволяющий изменить не только величину  $\rho_{\square}$ , но и уменьшить абсолютную величину ТКС, может быть осуществлен в среде с

повышенной температурой (терморегулирующий отжиг или путем нагрева при пропускании постоянного или импульсивного тока через резистор). При терморегулирующем отжиге ( $T=400^{\circ}\text{C}$ ) в пленке происходит несколько процессов:

- рекристаллизация, отжиг дефектов и уплотнение структуры;
- окисление пленки поверхностное и фронтальное (глубинное по границам зерен);
- фазовые переходы и превращения.

При рекристаллизации увеличиваются кристаллы, проводимость пленки возрастает.

При поверхностном окислении пленки толщина резистивной части слоя уменьшается, так как поверхностный слой становится окислом. Удельное сопротивление растёт (окислы, как правило, имеют значительно большее сопротивление). При появлении окисной прослойки между кристаллами (зернами) изменяется тип проводимости (она становится полупроводниковой), что увеличивает сопротивление пленки. Кроме того, уменьшение толщины резистивной пленки и появление окисной прослойки между зернами могут привести к изменению типа проводимости и изменению величины и даже знака ТКС (смена «+» на «-») за счет размерного эффекта и рассеяния на границе зерен.

Увеличение или уменьшение сопротивления пленки зависит от характера фазовых переходов, т.е. от того, какие фазы существовали в исходной пленке и какие образовались при воздействии повышенных температур (например,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_5$  или  $\text{SiO}_2$  т.д.). Подгонка пропусканием тока основана на окислении резистивной пленки с поверхности и по границам монокристаллов и преобразовании ее структуры вследствие закорачивания изолированных окисной пленкой микрокристаллов, миграции точечных, поверхностных и объемных дефектов структуры.

При электрохимической подгонке резистор 2, размещенный на подложке 1, подключен к одному из электродов источника постоянного напряжения 6 (рис.3.2). Для локальной подгонки на поверхность пленки наносят каплю электролита 4. При подаче «+» на резистор через электрод 5 и «-» на второй электрод 7 происходит электролиз воды, в результате которого анионы кислорода взаимодействуют с материалом пленки. Идет процесс анодного окислирования (анодирования), образуется слой окисла пленки, обладающий большим сопротивлением, что увеличивает сопротивление

ра. Изменение знаков напряжения на электродах приводит к обратному процессу – уменьшению оксидной пленки. Этот метод особенно эффективен для танталовой технологии. При анодировании одновременно с подгонкой резистор защищается от внешних воздействий стеклообразным беспористым слоем окисла.

При использовании метода уплотнения плотность пленки изменяется за счет накатки валиком или специально приспособленным карандашом с резиновым наконечником. При этом структура материала уплотняется, частично исключаются поры и рыхлые слои. Этот метод эффективен, когда пленки имеют пористую структуру и толщину более  $300\text{\AA}$ . Такие пленки формируются со скоростью осаждения  $100\text{ \AA}/\text{с}$  или при давлении остаточного газа более  $6 \cdot 10^{-3}\text{ Па}$ , когда наблюдается случайное закрепление частиц потока. Метод дешев, прост и легко реализуется на практике.

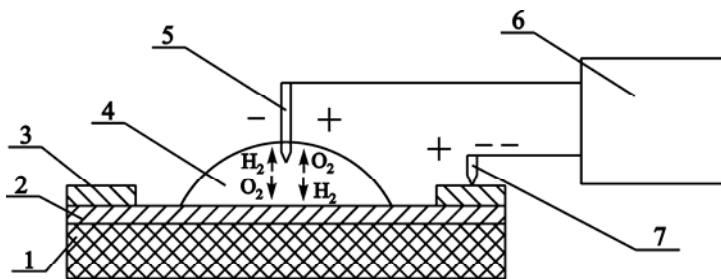


Рис.3.2. Электрохимическая подгонка

**Выбор метода подгонки.** Соответствующий метод выбирается с использованием критериев, которые формируются на основе анализа функциональных требований и принципиальной схемы на этапе разработки топологических чертежей. К качественным критериям относятся: отсутствие повреждений окружающих элементов, надежность подгоняемого резистора и ТКС. К основным количественным (или сводимым к количественным) критериям относятся: 1) точность подгонки; 2) минимальная ширина пленки резистора; 3) метод изготовления и материал пленки; 4) необходимость технологической или функциональной подгонки; 5) производительность.



## **Описание лабораторной установки**

В лабораторной работе студентами исследуются следующие методы подгонки изменением геометрии резистора: электроискровой метод, метод с использованием дополнительных перемычек и секций и метод подгонки изменением структуры материала пропусканием тока через резистор.

На макете 1 демонстрируется электроискровой и токовый методы подгонки. Макет состоит из координатного стола, игольчатого электрода, реле времени и органов управления. При реализации электроискрового метода напряжение с внешнего источника (ВСА-111К) подается на электрод, выполненный в виде иглы из тугоплавкого материала.

Для подгонки путем пропускания тока используется источник (ВСА-111К), на регулируемый выход которого подключается резистор. Время подгонки определяется электромеханическим реле времени.

Функциональный метод подгонки с использованием набора секций дополнительных резисторов исследуется на макете 2. Топологический чертеж микросборки показан на рис.3.3. Требуемые функциональные характеристики мультивибратора, схема которого показана на рис.3.4, формируются подключением отдельных подгоночных секций с помощью внешних перемычек.

## **Порядок выполнения работы**

Перед началом работы студент получает у преподавателя или лаборанта вариант задания и количественные данные требуемой технологической и функциональной точности.

### ***Исследование электроискрового метода***

**ВНИМАНИЕ!**

**ПОДКЛЮЧИТЬ МАКЕТ МОЖЕТ ТОЛЬКО ЛАБОРАНТ!!!**

1. Подключить макет 1 к источнику 26 В, соблюдая полярность.
2. Подключить макет к источнику ВСА-111К и установить необходимое напряжение.
3. Подключить омметр к клеммам на верхней панели макета.
4. Установить тумблер на передней панели макета в положение «ЭЛ.ИСК». Подгонка осуществляется легким нажатием на кнопку, расположенную на координатном столе, до соприкосновения иглы с поверхностью резистора в положении тумблера «ПОДГ». В положении тумблера «ИЗМ» измеряется сопротивление подгоняемого резистора.

5. Построить зависимость изменения сопротивления подгоночной секции  $\Delta R$  в относительной форме  $\frac{\Delta R}{R_{\Pi}} = f(x, y)$ , где  $R_{\Pi}$  – начальное сопротивление секции;  $x, y$  – координаты точек подгонки.

6. Определить координаты точки наибольшего изменения  $\Delta R$ . Сделать выводы.

### ***Исследование подгонки пропусканием тока через резистор***

1. Подключить омметр к клеммам.  
2. Подключить макет к источнику.  
3. Установить тумблер на передней панели в положение «ТОК».  
4. Потянув на себя и повернув в нужную сторону внешнее кольцо на реле времени, установить необходимую выдержку.

5. Установить наконечники электродов в центры контактных площадок одного из подгоночных резисторов.

6. Установить тумблер в положение «ИЗМ» и измерить сопротивление резистора  $R_{\Pi}$ .

7. Установить тумблер в положение «ПОДГ», нажать и отпустить кнопку «КН1» на передней панели макета, при этом должна загореться лампочка. После того как лампочка погаснет, повторить п.5.

8. Построить зависимость  $\frac{\Delta R}{R_{\text{подг}}} = f(\tau)$ , где  $\tau$  – время протекания тока через резистор.

При измерении интервал приращения времени составляет 1 мин. Получить три экспериментальные точки.

9. Проанализировать полученные результаты.

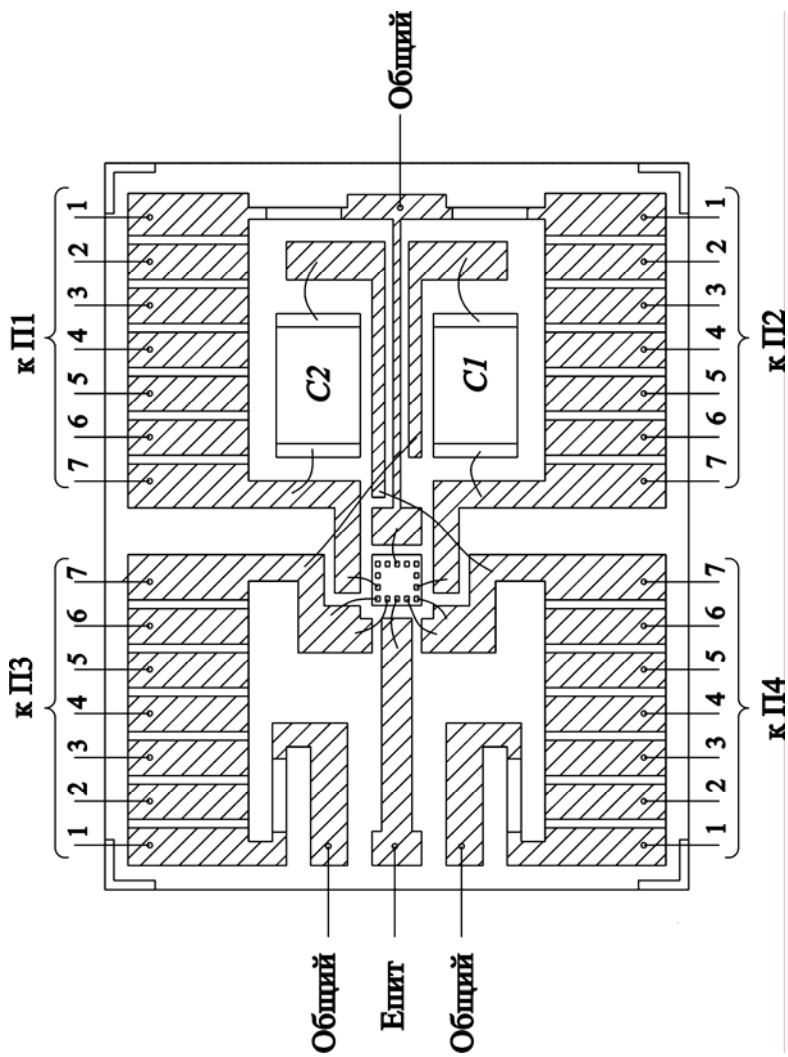


Рис.3.3. Топология микросборки для функциональной подгонки

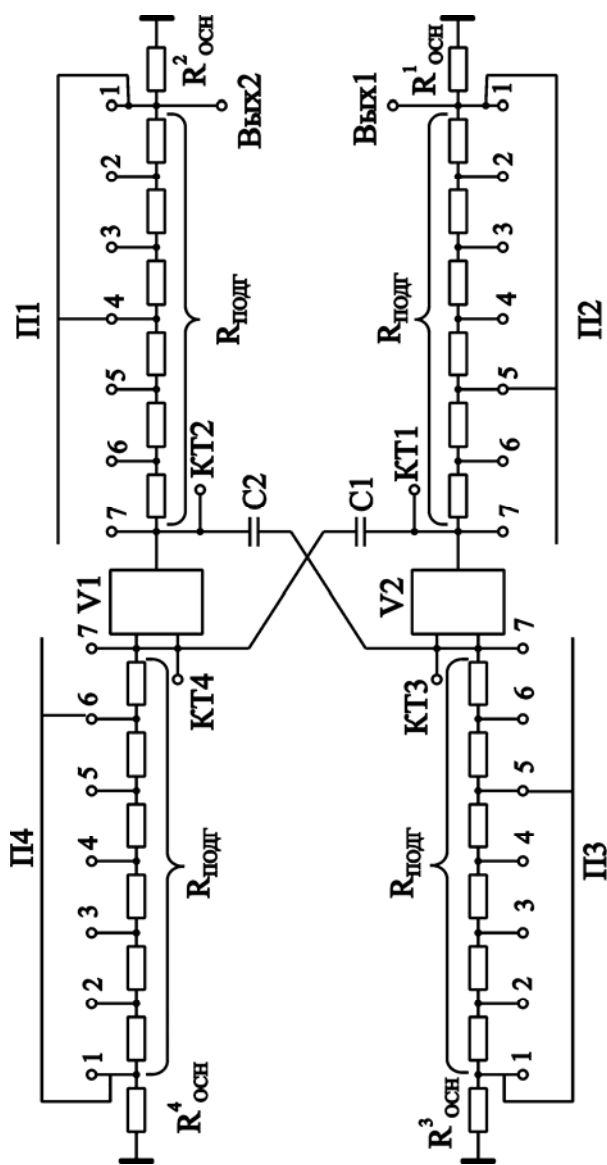


Рис.3.4. Схема функциональной подгонки

### ***Исследование функциональной подгонки (рис. 3.4)***

1. Подключить макет к источнику питания УНИП-5, соблюдая полярность.
2. Подключить частотомер к гнезду «Выход 1» макета.
3. Установить переключатели П1, П2 и П4 в положение «4».
4. Измерить частоту импульсов  $f$  на выходе мультивибратора в точках 1-7 переключателя ПЗ.
5. Выключить источник питания и подключить цифровой вольтметр к гнездам КТЗ  $\perp$ , подготовив его к измерению сопротивлений.
6. Измерить сопротивление в точках 1...7 переключателя ПЗ.
7. Подготовить вольтметр к измерению постоянных напряжений и подключить его к гнезду «Выход 1» макета.
8. Установить ПЗ в положение «4» и включить питание.
9. Измерить амплитуду импульсов  $U_{\text{вых}}$  в точках 1...7 переключателя П1.
10. Замерить сопротивление на гнездах КТ1  $\perp$  в точках 1-7 переключателя П1 (см. пп. 5 и 6).
11. Результаты экспериментов занести в таблицу.

| Параметры        | Номер экспериментальной точки |   |   |   |   |   |   |
|------------------|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|
|                  | 1                             | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| $f$              |                               |   |   |   |   |   |   |
| $R$              |                               |   |   |   |   |   |   |
| $U_{\text{вых}}$ |                               |   |   |   |   |   |   |

12. По результатам экспериментов дать заключение о точности функционального метода подгонки ( в процентах).
13. Сравнить исследованные методы и сделать выводы.

### **Содержание отчета**

1. Краткое описание работы (цель, основные методы и задание).
2. Электрическая схема измерений.
3. Результаты измерений.
4. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем вызвана необходимость введения в ТП изготовления МЭА технологической операции подгонки?
2. В каких технологических методиках возможна подгонка: в тонкопленочной, толстопленочной или полупроводниковой? Объясните Ваш ответ.
3. Дайте сравнительную характеристику групп методов подгонки.
4. Приведите основные критерии выбора метода подгонки.
5. Укажите область применения и варианты практической реализации функциональной подгонки.

### **Библиографический список**

Готра З.Ю. Тонкопленочные резисторы микросхем. – Львов: Каменяр, 1976. – С. 78-105.

## **Работа 4. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВКИ РАДИОАППАРАТУРЫ**

*Цель работы* – ознакомить студентов с основными методами оптимизации процесса регулировки РЭА.

### **Краткие теоретические сведения**

Современный уровень развития производства элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) не позволяет получить достаточно высокой точности значений их параметров. Поэтому после изготовления радиоэлектронного устройства необходимо его отрегулировать с целью получения оптимального (заданного) значения выходного параметра.

Под регулировкой РЭА понимают процесс компенсации разброса характеристик схемных элементов и влияния технологических факторов, а также сопряжения параметров отдельных устройств и блоков в процессе производства для приведения выходных параметров изделия в соответствие с нормами технических условий.

Регулировка выполняется путем подбора элементов аппаратуры, влияющих на выходные параметры, как непрерывно, так и дискретно.

Дискретная регулировка используется в тех случаях, когда требуется компенсировать вполне определенное значение выходного параметра, и связь выходного параметра и параметра регулировочного элемента определена.

Непрерывная, или плавная, регулировка предполагает возможность задания уровней выходного параметра через малые значения параметра регулировочного элемента, определенные чувствительностью измерительной аппаратуры.

В микροэлектронной аппаратуре, особенно на уровне микрочипов и функциональных ячеек, применяется дискретная регулировка, поскольку регулировочные элементы с непрерывным изменением параметра оказываются конструктивно несовместимыми с аппаратурой названных структурных уровней.

Регулировочные элементы могут быть зависимыми и независимыми. Для независимых регулировочных элементов порядок выполнения операций регулировки не имеет значения. В случае взаимной зависимости регулиро-

вочных элементов порядок выполнения операций регулировки должен быть строго определен.

Регулировочный элемент является составной частью радиоэлектронного устройства. Степень влияния регулировочного элемента на выходной параметр схемы определяется чувствительностью, в качестве прямых оценок которой принято использовать частные производные выходных параметров РЭА по вариациям параметров элементов. Следовательно, функции вида

$$S = \frac{\partial P_i}{\partial z_j} \quad (4.1)$$

называются функциями чувствительности  $j$ -го выходного параметра  $P_j$ ; по  $i$ -му регулировочному параметру  $z_i$ . Количественные оценки (4.1) носят название коэффициентов влияния.

Если учесть, что современные РЭА содержат большое количество отдельных элементов и различных взаимосвязанных блоков, то процесс регулировки представляет собой сложную техническую задачу, для решения которой необходимы квалифицированные кадры регулировщиков и большие материальные затраты.

Наибольший экономический эффект при использовании элементов с широкими допусками в сочетании с регулировкой в конструкциях РЭА может быть достигнут при наименьших затратах труда, времени и средств на эту операцию. Поэтому возникает, задача оптимизации технологического процесса регулировки радиоаппаратуры, т.е. разработки таких методов регулировки, которые позволили бы сократить время регулировки и, следовательно, материальные затраты и ускорить выпуск аппаратуры.

К основным затруднениям, возникающим при решении данной проблемы, следует отнести отсутствие удовлетворительных математических моделей, описывающих связь между выходными характеристиками устройств и параметрами элементов регулировки.

Процесс регулировки радиоаппаратов является совокупностью экспериментов, имеющих целью максимизацию (минимизацию) некоторой выходной характеристики. Оптимизация процесса регулировки может быть выполнена на основании информации, получаемой в результате постановки пассивного или активного эксперимента.

Пассивный эксперимент - это пассивное наблюдение за работой радиоаппарата в нормальном режиме, в результате которого удается собрать ста-



тистическую информацию, подлежащую соответствующей обработке. Активный эксперимент предполагает активное воздействие на радиоаппарат по заранее разработанной программе.

В большинстве случаев при решении задачи оптимизации процесса регулировки РЭА предпочтение отдается активному эксперименту. Подготовка к постановке активного эксперимента требует информацию о точности измерительной и вспомогательной аппаратуры, пределах изменения регулировочных параметров и их влияния на выходной параметр, квантования параметров по уровню и т.д.

Поэтому первым этапом процесса регулировки является сбор и изучение имеющейся информации, включающей исследование структуры и принципиальной схемы РЭА, с целью определения чувствительности к изменению параметров регулировочных элементов.

Для решения данной задачи можно воспользоваться методом ранговой корреляции, постановкой классического эксперимента на физической модели РЭА или определением функции чувствительности (4.1) при наличии математического описания радиоустройства.

Сущность метода ранговой корреляции состоит в рациональной обработке субъективной информации, полученной в результате опроса опытных специалистов-регулирующих, технологов и т.д.

Для систематизации качественной информации применяется так называемое ранжирование регулировочных элементов.

Под ранжированием понимается расположение  $n$  регулировочных элементов в порядке возрастания или убывания какого-либо признака  $x$ : степени влияния на выход, порядка регулировки, удобства регулировки и т.п. Ранг  $x_i$  указывает на то место, которое  $i$ -й регулировочный элемент занимает среди других  $n$  элементов, ранжированных в соответствии с признаком  $x$ .

Статистической характеристикой связи ранжированных объектов является коэффициент ранговой корреляции, оценивающий связь между качественными признаками отдельных объектов, представленными двумя ранжированными рядами. Однако наибольшее практическое значение имеет вопрос о корреляционной связи нескольких ранжированных рядов.

Пусть имеется ряд регулировочных элементов 1, 2,...,  $n$ , в разной степени обладающих одним и тем же признаком  $x$ . В результате опроса  $m$  специалистов, ранжирующих эти элементы по названному признаку, можно составить матрицу рангов (табл. 4.1) и определить общий коэффициент ран-

говой корреляции для группы исследователей, называемый коэффициентом конкордации

$$W = \frac{12S(d^2)}{m^2(n^3 - n)}, \quad (4.2)$$

где  $S(d^2) = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^m (x_{ji}) - \frac{1}{2} m(n+1) \right\}^2$ .

Таблица 4.1

| Специалисты | Регулировочные элементы |          |          |       |          |
|-------------|-------------------------|----------|----------|-------|----------|
|             | 1                       | 2        | $i$      | ...   | $n$      |
| 1           | $x_{11}$                | $x_{12}$ | $x_{1i}$ | ..... | $x_{1n}$ |
| 2           | $x_{21}$                | $x_{22}$ | $x_{2i}$ | ..... | $x_{2n}$ |
| $j$         |                         |          | $x_{ji}$ | ..... | $x_{jn}$ |
| :           |                         |          | :        |       | :        |
| $m$         | $x_{m1}$                | $x_{m2}$ | $x_{mi}$ | ..... | $x_{mn}$ |

Коэффициент конкордации  $W$  показывает степень согласия мнений специалистов о ранжировании регулировочных элементов по данному признаку.

При совпадении ранжировок по всем исследователям  $W=1$ , при отсутствии связи между ранжированными рядами  $W=0$ .

Как было отмечено выше, в качестве признака ранжирования регулировочных элементов может выступать степень влияния параметров регулировочных элементов на выходной параметр устройства, порядок обращения к регулировочным элементам при выполнении регулировки и т.д. Объективную информацию, характеризующую признак ранжировки элементов, получают в результате анализа столбцов матрицы рангов. Регулировочному элементу присваивается ранг, наибольшее число раз повторившийся в соответствующем столбце матрицы рангов.

Классический эксперимент (метод Гаусса-Зейделя) заключается в получении и исследовании зависимостей  $j$ -го выходного параметра радиоустройства от  $i$ -го регулировочного параметра  $z_i$  при фиксированных  $(n-1)$  регулировочных элементах и изменениях в определенных пределах:

$$P_j = f_i(z_i). \quad (4.3)$$

Зависимости (4.3), называемые иногда парциальными характеристиками, могут быть сняты на физической модели радиоустройства. Анализ полученных зависимостей позволяет выявить наиболее чувствительные элементы регулировки и установить пределы изменения параметров  $z_i$ , в которых сохраняется устойчивая работа радиоустройства. Количественно чувствительность выходного параметра  $P_j$  к изменению параметра  $i$ -го регулировочного элемента оценивается коэффициентом влияния равным крутизне парциальной характеристики в исследуемой точке:

$$S_{ji} = \frac{\Delta P_j}{\Delta z_i}. \quad (4.4)$$

Второй этап оптимизации - получение программы регулировки, обеспечивающей выход в область оптимального значения выходного параметра посредством дискретного изменения параметров регулировочных элементов с минимальными затратами времени - может быть выполнен на основе результатов первого этапа с помощью классического метода, метода динамического программирования и градиентных методов.

При использовании **классического метода** для выхода в область оптимального значения выходного параметра поочередно изменяют параметры каждого регулировочного элемента до достижения частного максимума. Траектория движения по поверхности функции  $P=f(z_1, z_2)$  показана на рис.4.1. Изменением параметра  $z_2$  начинают движение из исходной точки  $K$  в точку первого частного максимума  $L$ , из которой, варьируя параметр  $z_1$ , попадают в точку  $M$ . Многократное поочередное обращение к регулировочным элементам  $z_1$  и  $z_2$  позволяет достичь основного максимума  $P$ .

Недостатком метода является сложность и длительность траектории движения. При сложной поверхности функции  $P=f(z_1, z_2, \dots, z_n)$  процесс поиска оптимума классическим методом становится чрезвычайно трудоем-

ким и в ряде случаев не позволяет найти основной оптимум функции. На рис. 4.1 дана вторая траектория движения по поверхности  $P=f(z_1, z_2)$ , соответствующая другой стратегии регулирования. Как видно из рис. 4.1, движение заканчивается в частном максимуме  $P'$ . Предварительное исследование чувствительности параметра РЭА позволяет расширить возможности метода. Если процесс регулирования начинается с изменения регулировочного параметра, наиболее влияющего в исходном состоянии РЭА, то основной оптимум может быть достигнут значительно быстрее, а вероятность попадания в область частного оптимума уменьшена.

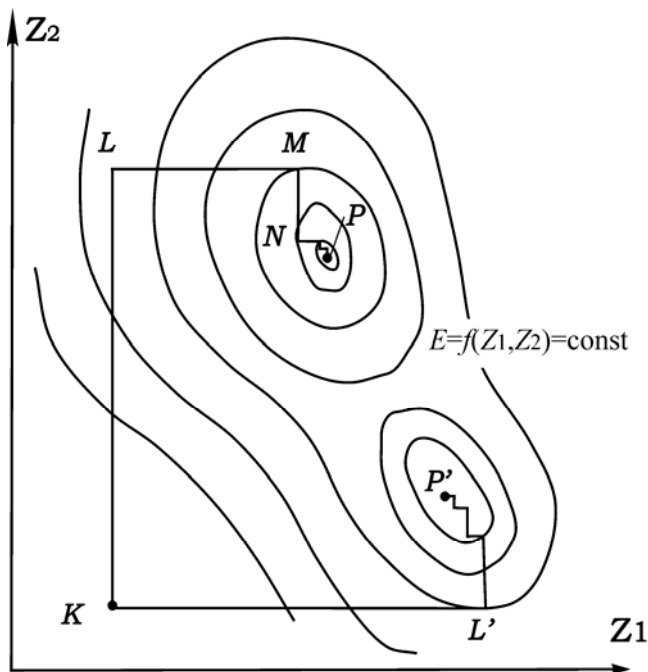


Рис.4.1. Траектория движения при регулировке классическим методом

Метод **динамического программирования** удобно интерпретировать как некоторый многошаговый процесс последовательного принятия условных оптимальных решений, причем решения на каждом шаге принимаются исходя из интересов всего процесса в целом, а не каждого шага в отдельности.

Для применения метода динамического программирования необходимо, чтобы задача имела многошаговую структуру, аналогичную структуре марковских цепей. Это означает, что решения, которые нужно принимать на последующих шагах, зависят только от решения, принятого на последнем шаге.

Процесс поиска оптимальной стратегии регулировки РЭА методом динамического программирования обычно разворачивается в обратном направлении: от конца к началу и может быть представлен следующим образом. Планируется  $m$ -шаговая операция регулировки. Относительно известного состояния выходного параметра РЭА на последнем  $m$ -м шаге  $P_m$  выполняются пробные движения по координатам параметров каждого из регулировочных элементов и выбирается управление, дающее максимальное приращение выходного параметра  $\Delta P$ . Это управление в процессе регулировки РЭА будет условно оптимальным  $m$ -м шагом относительно состояния выходного параметра на  $(m-1)$ -м шаге  $P_{m-1}$ . В результате выполнения найденного управления выходной параметр РЭА переводится в состояние  $P_{m-1}$ , относительно которого планируется  $(m-i)$ -й шаг, и т.д.

Пример поиска оптимальной стратегии регулировки РЭА, имеющего два регулировочных элемента:  $z_1$  и  $z_2$ , дан на рис. 4.2.

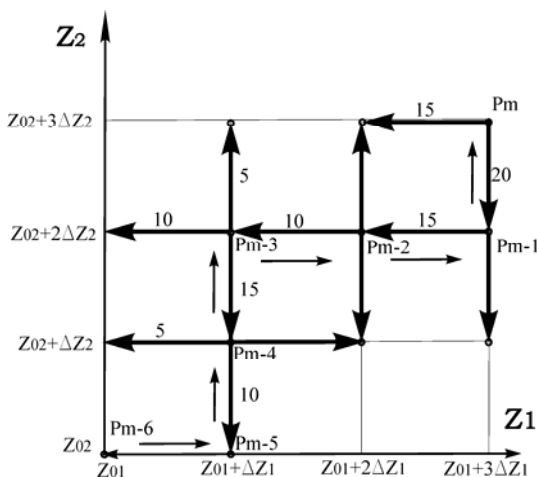


Рис.4.2. Построение оптимальной стратегии регулировки методом динамического программирования

Оптимальная стратегия регулирования РЭА представляет собой траекторию движения от состояния  $P_{m-6}$  к состоянию  $P_m$ , проходящую через точки  $P_{m-5}, \dots, P_{m-1}$ . Другие возможности стратегии регулирования не будут оптимальными. Найденную методом динамического программирования стратегию регулирования можно представить в виде диаграммы (рис. 4.3).

Как и классический метод, метод динамического программирования при сложной поверхности функции выходного параметра становится менее эффективным и в ряде случаев не позволяет осуществить выход в область основного экстремума.

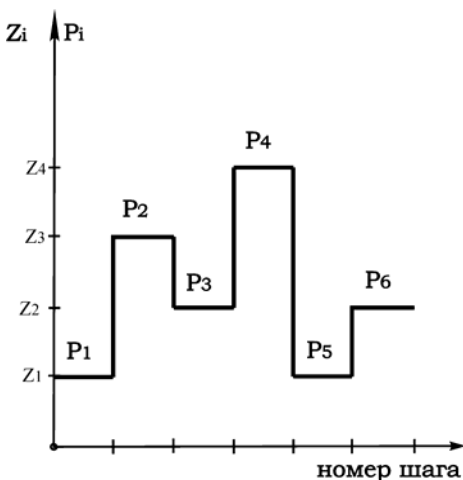


Рис.4.3. Диаграмма регулирования РЭА

**Градиентные методы** предусматривают движение к экстремуму функции выходного параметра РЭА  $P=f(z_1, z_2, \dots, z_n)$  из некоторой начальной точки  $K$  в направлении градиента (рис.4.4). Градиент функции выходного параметра

$$\text{grad}(P) = G(z) \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial z_1} \\ \dots \\ \frac{\partial P}{\partial z_n} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

определяется частными производными функции по каждому регулировочному параметру и представляет собой вектор, направленный по нормали к поверхности уровня функции в сторону ее возрастания и имеющий длину:

$$|G(z)| = \sqrt{\sum^n \left( \frac{\partial P}{\partial z_i} \right)^2}. \quad (4.6)$$

Движение к максимуму выходного параметра РЭА осуществляется изменением в положительном направлении параметров тех регулировочных элементов, для которых составляющие градиента положительны, и в отрицательном направлении вдоль координат тех регулировочных параметров, для которых составляющие градиента отрицательны.

Изменение функции выходного параметра:

$$\Delta P = G^t(z) \Delta z, \quad (4.7)$$

а вектор приращения параметров регулировочных элементов схемы определяется из выражения

$$\Delta z_j = z_{j+1} - z_j = \alpha_j S_j, \quad (4.8)$$

где  $\alpha_j$  — положительный скаляр, характеризующий шаг перемещения;

$$S_j = \frac{1}{|G(z)|} \cdot G(z) \quad (4.9)$$

- вектор направления градиента.

Из числа градиентных методов наиболее часто применяется **метод наискорейшего подъема (спуска)**. Движение в направлении вектора  $S_j$  совершается до тех пор, пока функция  $P$  возрастает (уменьшается). Затем пересчитывается градиент  $G(z)$  и движение повторяется в новом направлении. По мере приближения к экстремуму величина шага  $\alpha_j$  должна уменьшаться. Траектория движения к максимуму функции  $P=f(z_1, z_2)$  по методу наискорейшего подъема показана на рис. 4.4.

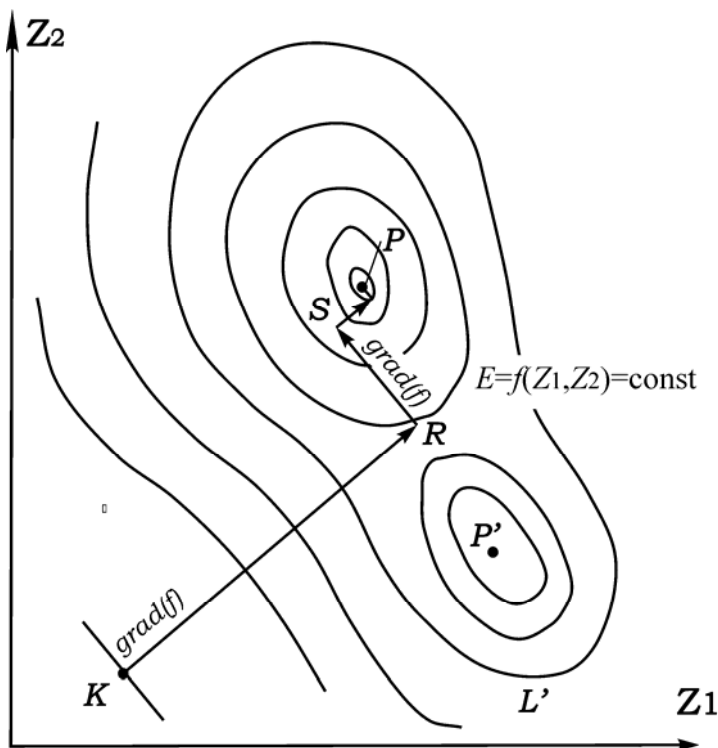


Рис.4.4. Стратегия регулировки градиентным методом

Градиентные методы также не лишены недостатков, свойственных рассмотренным выше методам оптимизации процесса регулировки: при сложной поверхности функция выходного параметра процесс регулировки может закончиться не в основном, а в частном экстремуме. Так, например, точка  $P'$  на рис. 4.4 может быть принята за основной максимум, поскольку движение из нее в любом направлении ведет к уменьшению функции  $P$ .

### Содержание задания

Задание к лабораторной работе включает в себя:

1. Разработку оптимальных стратегий регулировки усилителя промежуточной частоты (УПЧ) методами:

- ранговой корреляции;



- классического эксперимента;
  - классического эксперимента с предварительным анализом чувствительности выходного параметра к изменению параметров регулировочных элементов;
  - динамического программирования;
  - наискорейшего подъема (спуска).
2. Анализ и сравнительную оценку полученных стратегий регулирования по критерию временных затрат на регулировку УПЧ.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из макета двухкаскадного усилителя промежуточной частоты (УПЧ), подлежащего регулировке, универсального источника питания (УНИП-5), генератора стандартных сигналов (Г4-18А или аналогичного) и вольтметра (В3-3 или аналогичного).

Функциональная схема УПЧ приведена на рис. 4.5. Усилитель собран на двух микросхемах по двухконтурной схеме. Нагрузкой первого каскада УПЧ являются резонансные контуры  $L1C1$  и  $L2C2$ , нагрузкой второго каскада - резонансные контуры  $L3C3$  и  $L4C4$ .

На вход усилителя У1 подается амплитудно-модулированный сигнал с несущей частотой 465 кГц. Напряжение на выходе У2 контролируется вольтметром. Схема питается постоянным напряжением от встроенного стабилизированного источника.

Регулировка усилителя сводится к настройке резонансных контуров  $L1C1$ ,  $L2C2$ ,  $L3C3$ , и  $L4C4$  на частоту входного сигнала. Для настройки контуров используется дискретное изменение емкости конденсаторов  $C1 \dots C4$ . Шаг изменения емкости конденсаторов выбран постоянным и составляет 10 пФ для конденсатора  $C1$  и 36 пФ для конденсаторов  $C2 \dots C4$ . Окончание процесса, регулировки УПЧ определяется по максимальному показанию вольтметра, включенного на выходе усилителя.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить лабораторную установку к работе, для чего:
  - включить источник питания макета, генератор и вольтметр, дать приборам прогреться в течение 3...5 минут;
  - установить частоту выходного сигнала генератора 465 кГц;

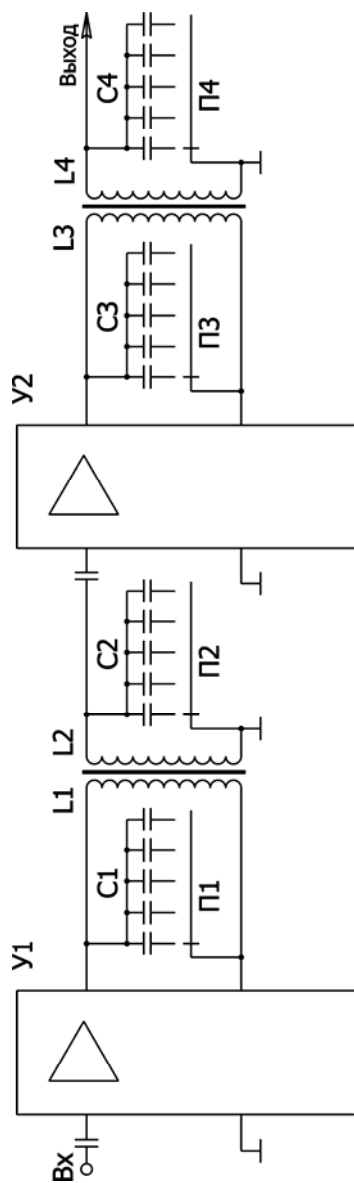


Рис.4.5. Функциональная схема установки

- установить выходное напряжение генератора равным 100 мВ;
- установить частоту модулирующего сигнала 1000 Гц, глубину модуляции 30-40%;
- откалибровать, при необходимости, чувствительность вольтметра в соответствии с инструкцией к измерительным приборам.

2. Исходя из принципа работы схемы УПЧ произвести ранжировку регулировочных элементов  $C1, C2, C3, C4$ . Для этого необходимо:

- составить матрицу рангов по форме табл. 4.1 для четырёх регулировочных элементов ( $n = 4$ ); количество специалистов определяется числом студентов в бригаде, выполняющей данную работу;
- по формуле (4.2) вычислить коэффициент конкордации;
- на основании данных табл. 4.1 установить порядок обращения к регулировочным элементам в процессе регулировки УПЧ.

3. Отрегулировать усилитель классическим методом и по числу обращений к регулировочным элементам оценить трудоемкость процесса.

4. Снять парциальные характеристики УПЧ  $U_{\text{вых}} = f(C_i)$ , производя переключателями П1...П4 поочередное дискретное изменение емкостей конденсаторов  $C1...C4$ . Первому положению переключателей соответствуют следующие значения емкостей конденсаторов:  $C1 = 100$  пФ,  $C2 = 10$  пФ,  $C3 = 10$  пФ. После выполнения эксперимента с  $i$ -м регулировочным элементом он возвращается в положение, определенное в п.3.

Данные эксперимента свести в таблицу следующего вида:

|                  |  |
|------------------|--|
| $C_i$            |  |
| $U_{\text{вых}}$ |  |

5. Построить зависимости  $U_{\text{вых}} = f(C_i)$  и по формуле (4.4) оценить чувствительность выходного напряжения УПЧ к изменению емкости конденсаторов  $C1...C4$  во всех фиксированных точках.

6. Составить оптимальную программу регулировки УПЧ классическим методом с учетом выполненного анализа чувствительности, сравнить с программой регулировки, полученной в п. 3 .

7. Расстроить УПЧ до получения на выходе усилителя напряжения  $U_{\text{вых}} = 0,1$  В, произвести регулировку по разработанной в п. 6 программе, оценить трудоемкость процесса регулировки.

8. Составить оптимальную программу регулировки УПЧ, используя метод динамического программирования. Для этого необходимо:

а) при настроенном УПЧ переключателями П1-П4 выполнить пробные шаги каждым из конденсаторов и определить соответствующие каждому шагу приращения выходного напряжения;

б) выбрать конденсатор, изменение емкости которого дает максимальное приращение выходного напряжения, и изменить его емкость на один шаг;

в) проделать указанные операции для новых состояний схемы до получения на входе УПЧ напряжения  $0,05 \dots 0,1$  В. Результаты эксперимента поместить в таблицу:

| Номер шага | $C1$        |                         | $C2$        |                         | $C3$        |                         | $C4$        |                         |
|------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
|            | $\Delta C1$ | $\Delta U_{\text{вых}}$ | $\Delta C2$ | $\Delta U_{\text{вых}}$ | $\Delta C3$ | $\Delta U_{\text{вых}}$ | $\Delta C4$ | $\Delta U_{\text{вых}}$ |
|            |             |                         |             |                         |             |                         |             |                         |

г) составить динамическую программу регулировки, отрегулировать УПЧ, расстроенный до выходного напряжения  $U_{\text{вых}}=0,1$  В, и оценить трудоемкость процесса регулировки.

9. Оптимизировать процесс регулировки УПЧ градиентным методом:

а) расстроить УПЧ до выходного напряжения  $U_{\text{вых}}=0,1$  В, выполнить поочередно пробное движение на один шаг вдоль координат каждого регулировочного параметра и определить соответствующие приращения выходного напряжения  $\Delta U_{\text{вых}}$ ;

б) по формуле (4.4) определить составляющие вектора градиента (4.5);

в) произвести перемещение по направлению градиента с постоянным шагом изменения параметров регулировочных элементов  $C1 \dots C4$  в точку поверхности функции  $U_{\text{вых}}=f(C1, C2, C3, C4)$ , в которой прекращается рост выходного напряжения;

г) повторив пп. 9а и 9б, определить новое направление градиента и выполнить перемещение в очередную промежуточную точку функции  $U_{\text{вых}}=f(C1, C2, C3, C4)$  и т.д. до достижения максимума выходного напряжения УПЧ;

д) оценить трудоемкость процесса регулировки УПЧ градиентным методом.

10. Произвести сравнительную оценку стратегий регулировки УПЧ, полученных в результате использования метода ранговой корреляции, постановки классического эксперимента и применения методов динамического программирования и наискорейшего подъема.

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Блок-схему лабораторной установки.
2. Матрицу рангов, расчет значения коэффициента конкордации, краткое описание стратегии регулировки УПЧ, полученной методом ранговой корреляции.
3. Таблицы и графики зависимостей  $U_{\text{вых}}=f(C_i)$ . Коэффициенты влияния емкости конденсаторов  $C1...C4$  для всех дискретных значений.
4. Краткое описание стратегии регулировки УПЧ классическим методом, оценку значения анализа чувствительности в решении задач оптимизации процесса регулировки.
5. Результаты эксперимента, относящиеся к разработке оптимальной стратегии регулировки УПЧ по методу динамического программирования, диаграмму регулировки усилителя.
6. Результаты расчета составляющих градиента для всех промежуточных точек поверхности  $U_{\text{вых}}=f(C1,C2,C3,C4)$ , краткое описание стратегии регулировки УПЧ по методу наискорейшего подъема.
7. Выводы, отражающие сравнительную оценку стратегий регулировки, полученных использованными методами оптимизации процесса регулировки.

### Библиографический список

1. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем. – Киев: «Техника», 1970. - С. 337-339.
2. Чуев Ю.В., Спехова Г.П. Технические задачи исследования, операций. – М.: «Советское радио», 1971. - С. 79-81.
3. Саульев В.К. Прикладная и вычислительная математика. Вып. 3. – М.: МАИ, 1971. – С. 36-48, 173-179, 193-195.
4. Олейников В.А. и др. Основы оптимального и экстремального управления. – М.: «Высшая школа», 1969. - С. 30-35.

## **Работа 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХУРОВНЕВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАНОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА**

*Цель работы* – изучить методику и освоить практические навыки получения математических моделей технологических процессов (ТП) в виде квадратичных полиномов, применяя точные, близкие к  $D$ -оптимальным планам типа  $B_k$ .

### **Общие теоретические сведения**

Для эффективного анализа явлений, лежащих в основе ТП, и последующего управления ими, необходимо выявить взаимосвязи между факторами, определяющими ход ТП, и представить их в количественной форме – в виде математической модели. Получение математической модели в виде полинома второй степени возможно различными методами активного (планируемого) эксперимента. Выбор оптимального плана эксперимента – задача достаточно сложная. За основу при сравнении вариантов планов принимают статистические критерии  $D$ -,  $G$ -,  $A$ -,  $E$ - и  $Q$ -оптимальности. В данной работе принята ориентация на критерий  $D$  оптимальности. Сущность этого критерия заключена в требовании выбора таких планов, которые обеспечивают минимальный объем эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов математической модели, вычисляемых по экспериментальным данным. Учитывают и другие характеристики плана. В практике моделирования ТП желательна близость к насыщенному плану. План называется насыщенным для данной модели, если число опытов плана  $N$  равно числу коэффициентов модели. Число коэффициентов полинома второй степени  $L$  зависит от числа факторов согласно выражению

$$L = \frac{(k+1)(k+2)}{2} . \quad (5.1)$$

Число коэффициентов, рассчитываемых по экспериментальным данным, не должно превышать число опытов, т. е. должно выполняться условие  $N \geq L$ .

Технологов, проводящих планируемый эксперимент, несомненно, интересуют планы с наименьшим числом уровней по каждому фактору. Полу-

чившие в настоящее время широкое распространение ортогональные и рототабельные композиционные планы второго порядка не отвечают этому требованию, так как предусматривают варьирование каждого фактора на пяти уровнях (+1, 0, -1, + $\alpha$ , - $\alpha$ , где  $\alpha$  - плечо звездных точек, отличающееся по величине от единицы). Смена уровней при реализации плана усложняет эксперимент, делает его более трудоемким и дорогостоящим, а в ряде случаев невозможным.

Требованию наименьшего числа уровней в полной мере удовлетворяют трехуровневые планы, в которых каждый фактор фиксируется на трех уровнях: +1, 0, -1. К такого рода планам относятся планы типа  $B_k$ . Эти планы содержат относительно небольшое число опытов, построенных на гиперкубе, и предусматривают расположение уровней факторов в вершинах  $k$ -мерного куба с координатами  $\pm 1$ . Кроме них в план эксперимента входят центры  $(k-1)$ -мерных граней гиперкуба, координаты которых принимают значения 0, 0, ...,  $\pm 1$ , 0, ..., 0. Эти точки по аналогии с ортогональными и рототабельными планами условно можно назвать «звездными» с величиной плеча  $\alpha = \pm 1$ . Общее число точек плана  $B_k$  составляет

$$N = 2^k + 2k. \quad (5.2)$$

Из формулы (5.2) следует, что с увеличением числа факторов (при  $k > 5$ ) резко возрастает число опытов. В этих случаях (в целях сокращения объема эксперимента) прибегают к использованию полуреplik или дробных реplik более высокого порядка от полного факторного эксперимента. Число опытов при этом рассчитывают по формуле

$$N = 2^{k-p} + 2k, \quad (5.3)$$

где  $p$  – число факторов, вводимых в матрицу планирования эксперимента вместо столбцов парного или более высокого уровня взаимодействий.

Пример заполнения матрицы для плана  $B_3$  приведен в табл. 5.1.

В данной работе математическая модель ТП должна иметь вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2. \quad (5.4)$$

В выражении (5.4) все управляемые переменные представлены в безразмерной (кодированной) форме, а соответствующие им коэффициенты имеют размерность параметра оптимизации  $y$  (представлены в вольтах).

Таблица 5.1

| Натуральное обозначение фактора $x_j$ |                      |       | $C1$ ,<br>(пФ) | $C3$ ,<br>(пФ) | $C4$ ,<br>(пФ) | Матрица $B_3$ планирования второго порядка для исследования технологического процесса настройки УПЧ по параметру максимум выходного напряжения, мВ<br>$y=U_{\text{вых}}$ |          |          |         |         |         |          |          |             |  |
|---------------------------------------|----------------------|-------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|-------------|--|
| Основной уровень $x_{j0}$             |                      |       | 91             | 250            | 405            |                                                                                                                                                                          |          |          |         |         |         |          |          |             |  |
| Интервал варьирования $\Delta x_j$    |                      |       | 7              | 50             | 105            |                                                                                                                                                                          |          |          |         |         |         |          |          |             |  |
| Верхний уровень (+1)                  |                      |       | 98             | 300            | 510            |                                                                                                                                                                          |          |          |         |         |         |          |          |             |  |
| Нижний уровень (-1)                   |                      |       | 84             | 200            | 300            |                                                                                                                                                                          |          |          |         |         |         |          |          |             |  |
| Кодовое обозначение факторов          |                      | $x_0$ | $x_1$          | $x_2$          | $x_3$          | $x_1x_2$                                                                                                                                                                 | $x_1x_3$ | $x_2x_3$ | $x_1^2$ | $x_2^2$ | $x_3^2$ | $y_{1i}$ | $y_{2i}$ | $\bar{y}_i$ |  |
| Номера опытов для                     | ПФЭ2к                | 1     | 1              | -1             | -1             | -1                                                                                                                                                                       | +1       | +1       | +1      | +1      | +1      | +1       |          |             |  |
|                                       |                      | 2     | 1              | +1             | -1             | -1                                                                                                                                                                       | -1       | -1       | +1      | +1      | +1      | +1       |          |             |  |
|                                       |                      | 3     | 1              | -1             | +1             | -1                                                                                                                                                                       | -1       | +1       | -1      | +1      | +1      | +1       |          |             |  |
|                                       |                      | 4     | 1              | +1             | +1             | -1                                                                                                                                                                       | +1       | -1       | -1      | +1      | +1      | +1       |          |             |  |
|                                       |                      | 5     | 1              | -1             | -1             | +1                                                                                                                                                                       | +1       | -1       | -1      | +1      | +1      | +1       |          |             |  |
|                                       |                      | 6     | 1              | +1             | -1             | +1                                                                                                                                                                       | -1       | +1       | -1      | +1      | +1      | +1       |          |             |  |
|                                       |                      | 7     | 1              | -1             | +1             | +1                                                                                                                                                                       | -1       | -1       | +1      | +1      | +1      | +1       |          |             |  |
|                                       |                      | 8     | 1              | +1             | +1             | +1                                                                                                                                                                       | +1       | +1       | +1      | +1      | +1      | +1       |          |             |  |
|                                       | “Звездных” то-чек 2К | 9     | 1              | +1             | 0              | 0                                                                                                                                                                        | 0        | 0        | 0       | +1      | 0       | 0        |          |             |  |
|                                       |                      | 10    | 1              | -1             | 0              | 0                                                                                                                                                                        | 0        | 0        | 0       | +1      | 0       | 0        |          |             |  |
|                                       |                      | 11    | 1              | 0              | +1             | 0                                                                                                                                                                        | 0        | 0        | 0       | 0       | +1      | 0        |          |             |  |
|                                       |                      | 12    | 1              | 0              | -1             | 0                                                                                                                                                                        | 0        | 0        | 0       | 0       | +1      | 0        |          |             |  |
|                                       |                      | 13    | 1              | 0              | 0              | +1                                                                                                                                                                       | 0        | 0        | 0       | 0       | 0       | +1       |          |             |  |
|                                       |                      | 14    | 1              | 0              | 0              | -1                                                                                                                                                                       | 0        | 0        | 0       | 0       | 0       | +1       |          |             |  |



Формула кодирования имеет вид

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_j^0}{\Delta \tilde{x}_j}, j = 1, 2, \dots, k, \quad (5.5)$$

где  $x_j$  - кодированное (безразмерное) значение фактора;  $\tilde{x}_j$  - натуральное (верхнее и нижнее) значение фактора;  $\tilde{x}_j^0$  - натуральное значение основного уровня фактора;  $\Delta \tilde{x}_j$  - интервал варьирования в натуральных единицах измерения  $j$ -го фактора.

Расчет коэффициентов уравнения (5.4) проводят по экспериментально-статистическим данным с использованием следующих выражений:

$$b_0 = E \cdot \sum_{i=1}^N \bar{y}_i + C \cdot \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 \bar{y}_i; \quad (5.6)$$

$$b_j = F \cdot \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i; \quad (5.7)$$

$$b_{ju} = M \cdot \sum_{i=1}^N x_{ji} x_{ju} \bar{y}_i; \quad (5.8)$$

$$b_{jj} = C \cdot \sum \bar{y}_i + (B - A) \cdot \sum x_{ji}^2 y_i + A \cdot \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 \bar{y}_i. \quad (5.9)$$

Для простоты вычисления оценок коэффициентов уравнения модели вида (5.4) в табл. 5.2 приведены основные характеристики планов  $B_k$  для  $k=2, 3, 4, 5$  и  $6$ .

В табл. 5.2 приняты следующие обозначения характеристик:

$k$  – число факторов;

$N$  – количество опытов в матрице плана (без учета повторных);

$a, P, r$  – элементы информационной матрицы плана;

$L$  – число неизвестных коэффициентов полиномов, подлежащих оценке по экспериментальным данным;

$A, B, C, E$  – элементы дисперсионной матрицы плана;

$F$  и  $M$  – обратные величины характеристик  $a$  и  $P$ , т. е.  $F=a^{-1}$  и  $M=P^{-1}$ .

Таблица 5.2

| $k$ | $N$ | $a$ | $P$ | $r$ | $L$ | $A$     | $B$   | $C$     | $E$   | $F$   | $M$    |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-------|---------|-------|-------|--------|
| 2   | 8   | 6   | 4   | 6   | 6   | 0.25    | 0.75  | -0.75   | 1.25  | 0.167 | 0.25   |
| 3   | 14  | 10  | 8   | 10  | 10  | -0.0937 | 0.406 | -0.156  | 0.406 | 0.1   | 0.125  |
| 4   | 24  | 18  | 16  | 18  | 15  | -0.104  | 0.396 | -0.0625 | 0.229 | 0.056 | 0.0625 |
| 5   | 42  | 34  | 32  | 34  | 21  | -0.0918 | 0.408 | -0.0332 | 0.158 | 0.029 | 0.0312 |
| 6   | 76  | 66  | 64  | 66  | 28  | -0.0794 | 0.421 | -0.0206 | 0.121 | 0.015 | 0.016  |

После вычисления коэффициентов математической модели производят оценку их значимости. Это связано с тем, что коэффициенты, вычисленные по экспериментальным данным, полученным в реальных лабораторных условиях, подвержены случайным изменениям.

Значимость коэффициентов оценивают по критерию Стьюдента с использованием величины дисперсии воспроизводимости, определяемой по результатам повторных опытов. При многократном повторении опытов ( $\gamma$  раз по каждой строке матрицы) дисперсию воспроизводимости опытов рассчитывают по формуле

$$S_{\text{вп}}^2 = \frac{\sum_{q=ii=1}^{\gamma} \sum_{i=1}^N (y_{iq} - \bar{y}_i)^2}{N \cdot (\gamma - 1)}, \quad (5.10)$$

где  $q$  – номера повторных опытов;

$y_{iq}$  – значение параметра оптимизации для  $i$ -й строки матрицы.

При двукратном повторении опытов ( $\gamma=2$ ) формула (5.10) принимает вид

$$S_{\text{вп}}^2 = \frac{2 \sum_{i=1}^N (y_{iq} - \bar{y}_i)^2}{N}, \quad (5.11)$$

Дисперсии оценок коэффициентов соответственно равны:

- для свободного члена уравнения

$$S_{b_0}^2 = E \cdot S_{\text{вп}}^2; \quad (5.12)$$

- для коэффициентов, учитывающих линейные эффекты

$$S_{b_j}^2 = F \cdot S_{\text{ВП}}^2 ; \quad (5.13)$$

- для коэффициентов, характеризующих эффекты парного взаимодействия

$$S_{b_{jU}}^2 = M \cdot S_{\text{ВП}}^2 ; \quad (5.14)$$

- для коэффициентов, учитывающих квадратичные эффекты

$$S_{b_{jj}}^2 = B \cdot S_{\text{ВП}}^2 . \quad (5.15)$$

Оценку значимости проводят по критерию Стьюдента:

а) для свободного члена полинома

$$t_0 = \frac{b_0}{S_{b_0}} ; \quad (5.16)$$

б) для линейных эффектов

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}} , j=1,2,\dots,k , \quad (5.17)$$

где  $b_j$  – вычисленные по экспериментальным данным коэффициенты уравнения, взятые по абсолютным значениям (без учета знака);

в) для коэффициентов парного взаимодействия

$$t_{jU} = \frac{|b_{jU}|}{S_{b_{jU}}} ; \quad (5.18)$$

г) для квадратичных эффектов

$$t_{jj} = \frac{|b_{jj}|}{S_{b_{jj}}} . \quad (5.19)$$

Если вычисленное значение  $t_0$ ,  $t_j$ ,  $t_{ju}$  или  $t_{jj}$  окажется больше табулированного  $t_T$ , взятого, например, из [1] с учетом выбранного доверительного уровня (обычно  $P=0,95$ ) и соответствующего числа степеней свободы

$f_{\text{ВП}}=N(\gamma - 1)$ , то соответствующие коэффициенты  $b_0$ ,  $b_j$ ,  $b_{ju}$  и  $b_{jj}$  следует считать значимыми, их и включают в математическую модель.

Коэффициенты, не удовлетворяющие требованию критерия Стьюдента, исключаются из модели вместе с соответствующими переменными.

Адекватность полученной таким образом модели проверяют путем сравнения измеренных (экспериментальных) значений параметра оптимизации с вычисленными по модели. Дисперсию адекватности, характеризующую отклонением расчетных значений от экспериментальных, рассчитывают по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - L_3}, \quad (5.20)$$

где  $\hat{y}$  - значение параметра оптимизации, рассчитанное по математической модели для  $i$ -й строки матрицы;

$L_3$  - число значимых коэффициентов математической модели.

Окончательное решение об адекватности модели реальному технологическому процессу принимают на основе сравнения расчетного значения величины  $F_p$  с критерием Фишера.

Величину  $F_p$  находят по формуле

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{ВП}}^2} \quad (5.21)$$

и сравнивают с табличным значением критерия Фишера  $F_T$ , взятым, например, из [1, табл. П.2].

Гипотезу об адекватности модели можно считать правильной, если выдерживается соотношение  $F_p < F_T$ .

Полученная математическая модель, отвечающая требованиям адекватности, в дальнейшем может быть использована для выбора оптимальных режимов, наладки и управления технологическим процессом, а также для решения других задач.

## Задание

1. Ознакомиться с описанием экспериментальной установки и получить вариант задания у преподавателя или лаборанта.

2. Заполнить матрицу планирования эксперимента (см. форму табл.5.1) соответствующими значениями основных уровней факторов и интервалов их варьирования, а также значениями для столбцов парного взаимодействия и квадратичных эффектов, используя необходимые алгебраические вычисления.

3. Рассчитать значения коэффициентов математической модели в виде уравнения (5.4), используя для этого программу «PLAN B3».

4. Оценить значимость полученных коэффициентов по критерию Стьюдента. Исключить незначимые коэффициенты вместе с соответствующими переменными и записать уравнение математической модели ТП в безразмерном виде (кодированной форме).

5. Проверить адекватность модели экспериментальным данным по критерию Фишера.

6. Определить экстремум параметра оптимизации по полученной модели. Настроить макет УПЧ (рис. 4.5) на экстремальный режим. Сравнить полученные расчетные значения параметра оптимизации и экспериментальные данные.

7. Оценить степень и характер влияния емкости конденсаторов на выходное напряжение УПЧ, используя для этого однофакторные модели.

8. Проанализировать полученные результаты, сформулировать выводы и рекомендации.

## Описание лабораторной установки

Практическая часть лабораторной установки представляет собой двухкаскадный усилитель промежуточной частоты (УПЧ) со встроенным источником питания. Усилитель содержит два каскада усиления. Нагрузкой 1-го каскада УПЧ являются резонансные контура  $L1C1$  и  $L2C2$ , нагрузкой 2-го каскада - контуры  $L3C3$  и  $L4C4$ . Структурная схема установки представлена в РАБОТЕ 4 (рис.4.5).

На вход УПЧ с генератора стандартных сигналов подается амплитудно-модулированный сигнал частотой 465 кГц и амплитудой 50 мВ. Глубина модуляции 30...40%, частота модулирующего сигнала – 1кГц. Сигнал на выходе УПЧ контролируется вольтметром.

Регулировка УПЧ заключается в настройке резонансных контуров  $L1C1$ ,  $L2C2$ ,  $L3C3$  и  $L4C4$  на частоту входного сигнала 465 кГц. Настройка контуров обеспечивается дискретным изменением емкости конденсаторов  $C1...C4$  с помощью переключателей П1...П4 соответственно.

В табл.5.3 приведены необходимые данные подстроечных конденсаторов УПЧ.

Таблица 5.3

| Номер конденсатора (переключателя)                                        | $C1(П1)$ | $C2(П2)$ | $C3(П3)$ | $C4(П4)$ |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Значение емкости конденсатора $C_i$ , пФ в первом положении переключателя | 56       | 270      | 150      | 300      |
| Шаг (дискретность) изменения емкости конденсаторов $\Delta C_i$ , пФ      | 7        | 40       | 25       | 35       |

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой УПЧ и макетом лабораторной установки.
2. Получить вариант задания (табл. 5.4), проанализировать по табл.5.3 исходные данные (значения емкости конденсаторов в начальном крайнем левом) состоянии переключателей и величины дискретности изменения емкости в процессе регулировки УПЧ.
3. Получить бланк матрицы планирования и заполнить в соответствии с номером заданного варианта левую верхнюю часть таблицы. Пример заполнения этой части матрицы для варианта №11 в табл. 5.1. Остальная часть матрицы для 14-ти строк является общей для всех вариантов. Число варьируемых факторов  $k=3$  (емкость одного из конденсаторов остается постоянной).
4. Установить в исходное состояние положения переключателей П1...П4 в соответствии с заданным вариантом. Подать с генератора на вход УПЧ сигнал частотой 465 кГц амплитудой 50мВ при глубине модуляции 30...40%. Проверить наличие напряжения на выходе УПЧ с помощью вольтметра и зафиксировать его значение в отчете.

Таблица 5.4

| № варианта | Значение емкости конденсаторов в исходном состоянии, пФ.<br>Основной уровень матрицы планирования |           |           |           | Положение переключателей в исходном состоянии |    |    |    | Диапазон изменения положения переключателей в процессе эксперимента относительно начального положения (число делений) переключателя.<br>Интервал варьирования |    |    |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------------------|----|----|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|
|            | <i>C1</i>                                                                                         | <i>C2</i> | <i>C3</i> | <i>C4</i> | П1                                            | П2 | П3 | П4 | П1                                                                                                                                                            | П2 | П3 | П4 |
| 1          | 70                                                                                                | 350       | 225       | 370       | 3                                             | 3  | 4  | 3  | ±1                                                                                                                                                            | ±1 | ±2 | 0  |
| 2          | 84                                                                                                | 390       | 200       | 400       | 5                                             | 4  | 3  | 5  | ±1                                                                                                                                                            | 0  | ±2 | ±2 |
| 3          | 77                                                                                                | 430       | 250       | 405       | 4                                             | 5  | 5  | 4  | ±2                                                                                                                                                            | ±2 | 0  | ±3 |
| 4          | 63                                                                                                | 390       | 175       | 440       | 2                                             | 4  | 2  | 5  | ±1                                                                                                                                                            | ±3 | ±1 | 0  |
| 5          | 91                                                                                                | 390       | 275       | 335       | 6                                             | 4  | 6  | 2  | ±1                                                                                                                                                            | 0  | ±1 | ±1 |
| 6          | 70                                                                                                | 310       | 250       | 370       | 3                                             | 2  | 5  | 3  | ±2                                                                                                                                                            | ±1 | 0  | ±2 |
| 7          | 77                                                                                                | 390       | 200       | 405       | 4                                             | 4  | 3  | 4  | ±2                                                                                                                                                            | 0  | ±2 | ±3 |
| 8          | 63                                                                                                | 390       | 250       | 370       | 2                                             | 4  | 5  | 3  | ±1                                                                                                                                                            | ±3 | 0  | ±2 |
| 9          | 84                                                                                                | 350       | 225       | 370       | 5                                             | 3  | 4  | 3  | ±2                                                                                                                                                            | ±2 | ±3 | 0  |
| 10         | 77                                                                                                | 430       | 200       | 405       | 4                                             | 5  | 3  | 4  | 0                                                                                                                                                             | ±1 | ±2 | ±3 |
| 11         | 91                                                                                                | 390       | 250       | 405       | 6                                             | 4  | 5  | 4  | ±1                                                                                                                                                            | 0  | ±2 | ±3 |

5. Провести практическую часть работы, меняя положения переключателей П1...П4 в соответствии с матрицей планирования экспериментов, соблюдая рандомизацию (случайный порядок) их чередования. Для оценки ошибок эксперимента или воспроизводимости результатов необходимо повторение опытов по каждой строке два раза. Случайная последовательность реализации экспериментов распространяется и на повторные опыты.

Варьирование емкости конденсаторов производить в соответствии с матрицей планирования экспериментов (табл. 5.1), в которой указаны нижний уровень (-1), верхний (+1) и основной – (0). Соответственно с этим нижний уровень достигается поворотом переключателя влево от исходного положения (основного уровня) на число делений, указанных в табл.5.4 вариантов заданий, верхний уровень – поворотом переключателя вправо на такое же число делений, основной уровень реализуется установкой переключателя в исходное состояние согласно табл.5.4.

**Будьте внимательны при приведении эксперимента!**

Например, для варианта №11 варьирование емкости конденсатора  $C1$  относительно основного (нулевого) уровня (6-е деление переключателя П1) согласно табл.5.4 достигается поворотом этого переключателя на одно деление влево (нижний (-1) уровень на матрице планирования) и одно деление вправо (верхний (+1) уровень). Емкость конденсатора  $C2$  в данном варианте не варьируется в течение всего эксперимента (остается зафиксированной на 4-м делении переключателя П2).

Варьирование емкости  $C3$  осуществляется переводом переключателя П3 на 2 деления относительно 5-го положения влево (нижний (-1) уровень по матрице планирования) и на 2 деления вправо (верхний (+1) уровень).

Изменение емкости  $C4$  относительно основного уровня (переключатель П4 на 4-м делении) производится поворотом этого переключателя на 3 деления влево, а затем вправо соответственно нижнему (-1) и верхнему (+1) уровням этого фактора в матрице планирования.

После установки всех переключателей в положение, соответствующее определенному номеру опыта по матрице планирования, зафиксировать в графе  $y_{1i}$  или  $y_{2i}$  определенное для этой комбинации емкостей значение выходного напряжения УПЧ. Таким образом, должны быть воспроизведены все 28 опытов.

6. Произвести расчет коэффициентов математической модели в форме квадратичного полинома (формула (5.4)). Расчет коэффициентов, оценка их значимости и проверка адекватности производится на ЭВМ по программе «ПЛАНВЗ».

7. Оптимальные значения емкости конденсаторов, соответствующие максимальному выходному напряжению УПЧ, найти путем решения системы уравнений  $\frac{\partial y}{\partial x_1} = 0$ ,  $\frac{\partial y}{\partial x_2} = 0$  и  $\frac{\partial y}{\partial x_3} = 0$ .

Решив эту систему линейных уравнений, получите  $x_1^*$ ,  $x_2^*$ ,  $x_3^*$ . Подставив эти значения в уравнение (5.4) с численными значениями коэффициентов, оцените величину максимального выходного напряжения УПЧ и запишите в протокол.

8. Оценку степени и характера влияния емкости конденсаторов на выходное напряжение УПЧ произвести с использованием однофакторных моделей, составленных на основе математической модели, полученной в п.6 с численными значениями коэффициентов.



В общем виде эти уравнения выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} F(x_1) &= b_{11}x_1 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1^2; \\ F(x_2) &= b_{22}x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{22}x_2^2; \\ F(x_3) &= b_{33}x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{33}x_3^2. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Подставляя в эти уравнения экстремальные значения емкостей конденсаторов  $x_1^{\vartheta}$ ,  $x_2^{\vartheta}$ ,  $x_3^{\vartheta}$ , оценить вклад каждого из них в достижение максимума выходного напряжения УПЧ.

9. Оптимальные значения  $x_1^{\vartheta}$ ,  $x_2^{\vartheta}$  и  $x_3^{\vartheta}$ , выраженные в кодированной (безразмерной) форме, необходимо перевести в натуральный масштаб измерения факторов в соответствии с формулой:

$$\tilde{x}_j^{\vartheta} = \tilde{x}_j^0 + x_j^{\vartheta} \cdot \Delta\tilde{x}_j, j=1,2,3. \quad (5.23)$$

Здесь обозначения те же, что в формуле (5.5). Значение  $\tilde{x}_j^0$  (основной уровень) и  $\Delta\tilde{x}_j$  (интервал варьирования) для каждого фактора брать из верхней левой части матрицы планирования (табл. 5.1). Вычисленные по формуле (5.23) оптимальные значения емкостей конденсаторов зафиксировать в протоколе отчета. Полученное экспериментальное значение выходного напряжения УПЧ сравнить с вычисленным в п. 7 настоящего задания по математической модели (формула (5.4)). Найти также максимальное напряжение на выходе УПЧ, полученное в процессе эксперимента в матрице планирования. Сравните эти результаты и отразите их в выводах.

### Содержание отчета

1. Исходные данные.
2. Схема лабораторной установки.
3. Матрица плана эксперимента  $B_3$  по форме табл. 5.1 с экспериментальными данными на бланке.
4. Математическая модель объекта моделирования с численными значениями коэффициентов в безразмерной (кодированной) форме.

5. Оптимальные значения емкостей конденсаторов УПЧ и расчетное (по полученной модели) значение максимального выходного напряжения.
6. Анализ математической модели и полученных результатов, сравнение вычисленных значений с экспериментальными данными.
7. Рекомендации по выбору оптимальных значений емкости конденсаторов для обеспечения максимального выходного напряжения УПЧ.
8. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте сравнительную характеристику ортогонального плана  $B_k$  в моделировании ТП.
2. Назовите основные критерии, используемые при выборе оптимального плана эксперимента.
3. Приведите схемы уровней для трех факторов при ортогональном планировании и для плана типа  $B_3$ .
4. Особенности составления матриц планирования экспериментов по ортогональному плану и типа  $B_3$ .
5. Приведите формулы кодирования факторов и перехода к натуральному масштабу измерения факторов.
6. Оцените основные свойства матрицы плана  $B_3$ .
7. Приведите методику оценки воспроизводимости опытов и значимости вычисленных коэффициентов математической модели.
8. Как оценивается адекватность полученной модели экспериментальным данным?
9. Как оценивается степень и характер влияния каждого фактора на параметр оптимизации?
10. Приведите в общем виде математическую модель для четырех факторов.

### **Библиографический список**

1. . Сахаров М.А. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления РЭС и БВС – М.: Изд-во МАИ, 1992.

## **Работа 6. ИЗУЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИЕМОЧНОГО КОНТРОЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

*Цель работы* – ознакомить с различными методами статистического приемочного контроля качества элементов микроэлектронной аппаратуры.

### **Общие теоретические сведения**

#### ***Характеристика выборочного контроля качества изделий***

Выборочный контроль применяют, если сплошной контроль невозможен (например, испытательные операции являются разрушающими) либо нецелесообразен (высокая стоимость контрольных операций или большая их продолжительность; большое число изделий, подлежащих контролю, особенно в крупносерийном и массовом производстве; проведение испытаний на предельные воздействия, ухудшающие эксплуатационные характеристики выпускаемых изделий). Практически все контрольные операции ОТК, начиная от входного контроля комплектующих электрорадиоэлементов и материалов и заканчивая приемосдаточными испытаниями готовых изделий, основаны на выборочном контроле качества изделий.

Выборочный контроль может проводиться либо по *качественным*, либо по *количественным* признакам. Первый из них основан на оценке качественных характеристик изделий в выборке по альтернативному признаку (контроль по принципу “годен – негоден”). Второй метод базируется на измерении количественных характеристик изделий в выборке и оценке математического ожидания и среднего квадратического отклонения контролируемого параметра.

Статистический приемочный контроль базируется на знании основ теории вероятностей и математической статистики и позволяет определить строгие соотношения между объектом контроля и достоверностью принимаемых решений о качестве партий изделий, находить оптимальные планы контроля, правила приемки-браковки и т. п. Решающее значение здесь приобретают условия поставки и приемки, определяемые договором между изготовителем и потребителем. Различают следующие методы статистического приемочного контроля по качественным признакам: метод однократной выборки, метод двукратной выборки, метод последовательного анализа.

При применении выборочных методов контроля суждение о качестве (доле брака) всей партии выносится на основании исследования доли брака в ограниченной выборке из партии. При этом возникают ошибки двух родов:

- **ошибка 1 рода  $\alpha$** , называемая риском изготовителя – вероятность забраковать по результатам контроля выборки годную партию изделий, истинная доля брака (дефектных изделий) в которой равна или меньше приемлемого уровня качества  $p_{\alpha}$  за счет попадания в выборку относительно большей доли бракованных изделий;

- **ошибка 2 рода  $\beta$** , называемая риском потребителя (или заказчика) – вероятность принять по результатам контроля выборки партию изделий с истинной долей дефектных изделий равной или большей  $p_{\beta}$ , называемой браковочным уровнем качества, за счет случайного попадания в выборку преимущественно годных изделий из партии.

Исходя из определения ошибок 1 и 2 рода, рациональный план контроля должен разрабатываться с учетом малости вероятностей  $\alpha$  и  $\beta$  принятия ошибочных решений. Значения вероятностей  $\alpha$  и  $\beta$  устанавливаются договором между изготовителем и потребителем и в большинстве случаев выбираются близкими соответственно к 0,05 и 0,1.

Между  $p_{\alpha}$  (приемлемым уровнем качества) и  $p_{\beta}$  (браковочным уровнем качества) находится, с точки зрения решения о принятии или отклонении партии изделий, область неопределенности.

При определении рационального плана выборочного контроля используют так называемые оперативные характеристики (ОХ) контроля, показывающие, с какой вероятностью  $L(p)$  доля бракованных изделий **во всей партии** не превышает нормативный (договорной, приемлемый, допустимый) уровень качества  $p_0$ , если **в ограниченной выборке** из партии наблюдается доля брака  $p$ . По ОХ устанавливается взаимосвязь между величинами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $p_{\alpha}$ ,  $p_{\beta}$  и параметрами плана контроля – объемом выборки  $n$  и приемочным числом  $c$  (рис.6.1). Оперативная характеристика характеризует зависимость вероятности принятия **партий** от уровня их качества. Оперативная характеристика содержит информацию об эффективности плана контроля, служит для сопоставления и оценки различных методов выборочного контроля.

**Метод однократной выборки** (рис. 6.2) устанавливает принцип оценки партии объема  $N$  по одной выборке, в которую случайным образом ото-

брано  $n < N$  изделий. Для оценки используют приемочное число  $c$ . Если в выборке количество дефективных изделий  $m \leq c$ , то партия считается годной и принимается. Если  $m > c$ , то партия бракуется и возвращается изготовителю как не удовлетворяющая требованиям по качеству.

Оперативная характеристика выборочного контроля при однократной выборке представляет собой монотонно убывающую от 1 до 0 функцию  $L(p)$  (рис. 6.1). На кривой ОХ выделяют несколько характерных точек, которые позволяют рассчитывать и строить планы выборочного контроля. Эти характерные точки находят следующим образом.

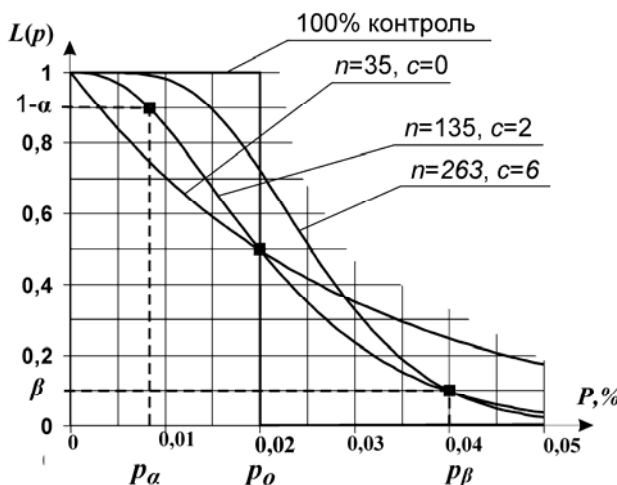


Рис.6.1. Оперативная характеристика

При 100% контроле всех изделий в партии можно точно установить долю брака  $p$  в партии (выборка равна партии) и выявить вид функции  $L(p)$ . Принимаются все партии с  $p \leq p_0$ , а партии с  $p > p_0$  бракуются. Для этого случая

$$L(p) = \begin{cases} 1, & \text{для } p > p_0 \\ 0, & \text{для } p \leq p_0 \end{cases}$$

и ОХ имеет вид прямоугольника (рис. 6.1).

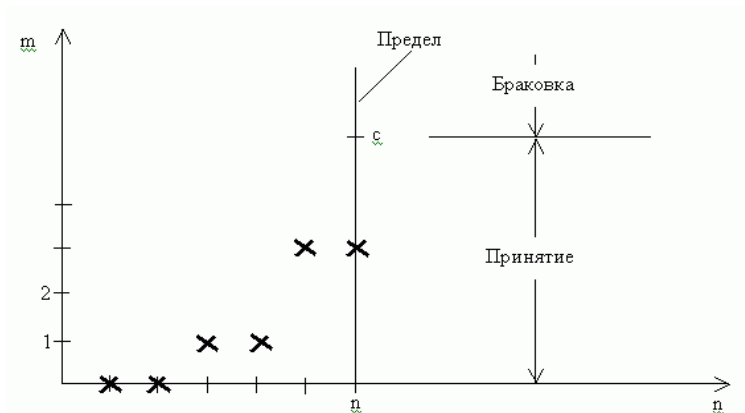


Рис.6.2. Метод однократной выборки

При объеме выборки  $n < N$  ОХ отражает вероятность попадания в выборку объемом  $n$  не более  $m$  бракованных изделий, или наблюдения в выборке доли брака  $p = m/n$ , при условии, что истинная доля брака в партии равна  $p_0$ . Вероятность попадания в выборку объемом  $n$ , взятую из партии объемом  $N$  изделий, содержащей  $M$  бракованных, ровно  $m$  описывается гипергеометрическим распределением, которое при большом объеме партии ( $N \rightarrow \infty$ ) может быть заменено биномиальным, а при малой доле бракованных в партии и в выборке ( $p < 0,1$ ) хорошей аппроксимацией является распределение Пуассона. На рис.6.1 показаны кривые ОХ выборочного контроля для разных объемов выборки  $n$  и приемочного числа  $c$ . Из рис. 6.1 можно видеть:

- С ростом объема выборки  $n$  ОХ становится более крутой, приближается к прямоугольной ОХ сплошного контроля. Зона неопределенности между  $p_\alpha$  и  $p_\beta$  уменьшается, но одновременно растет трудоемкость контроля.
- Через каждую точку  $(p_\beta, \beta)$  проходит множество ОХ с разным сочетанием объема выборки и приемочного числа. Имеется возможность выбрать план контроля с наименьшей трудоемкостью и приемлемой достоверностью контроля.

Для расчета объема выборки  $n$  по заданным значениям  $c$ ,  $\beta$  и  $p_\beta$  можно воспользоваться номограммой, показанной на рис. 6.3. Из номограммы для

заданных  $L(p)=\beta$  и приемочного числа  $c$  находится значение  $\lambda=n \cdot p_\beta$ , из которого определяется требуемый объем выборки, т. е.

$$n = \frac{\lambda}{p_\beta}.$$

Дробные значения округляют в большую сторону.

Контроль **методом двукратной выборки** (рис. 6.4) начинается с проверки случайной выборки объемом  $n_1$  из партии изделий объема  $N$ . Если среди проверенных  $n_1$  изделий количество дефектных  $m_1$  не превышает первое приемочное число  $c_1$ , то есть  $m_1 \leq c_1$ , то партия принимается. Если  $m_1 > c_2$ , то партия сразу бракуется. Если  $c_1 < m_1 \leq c_2$ , контроль продолжается. Берется вторая выборка объемом  $n_2$  и для нее определяется количество дефектных изделий  $m_2$ . Если общее число обнаруженных дефектных изделий в двух последовательных выборках  $(m_1 + m_2) \leq c_3$ , то партия принимается. В противном случае партия бракуется. Для одно- и двукратно выборочных планов по известным параметрам  $n_1, c_1, c_2, n_2, c_3$  можно построить оперативную характеристику, рассматривая ее как вероятность принятия партии с долей брака  $p$ .

Контролируемые характеристики для контроля партии изделий по методу двукратной выборки могут быть определены следующим образом:

- 1) объем первой выборки  $n_1$  должен составлять две трети от объема эквивалентной однократной выборки, т.е.  $n_1 = 2/3 n_0$ ;
- 2) объем второй выборки должен в два раза превышать объем первой выборки, т. е.  $n_2 = 2n_1$ .

Метод двукратной выборки дает выигрыш в трудоемкости контроля, если решение о приемке или браковке партии принимается по результатам контроля первой выборки, то есть для партий изделий, качество которых существенно выше нормативного  $p_0$  либо существенно ниже нормативного.

**Метод последовательного анализа.** Объем испытаний заранее не устанавливается, а количество изделий в выборке постепенно увеличивается, т. е. из проверяемой партии последовательно (но случайным образом) берутся изделия по одному (или по несколько) и определяются их характеристики. По этим характеристикам принимается одно из трех решений:

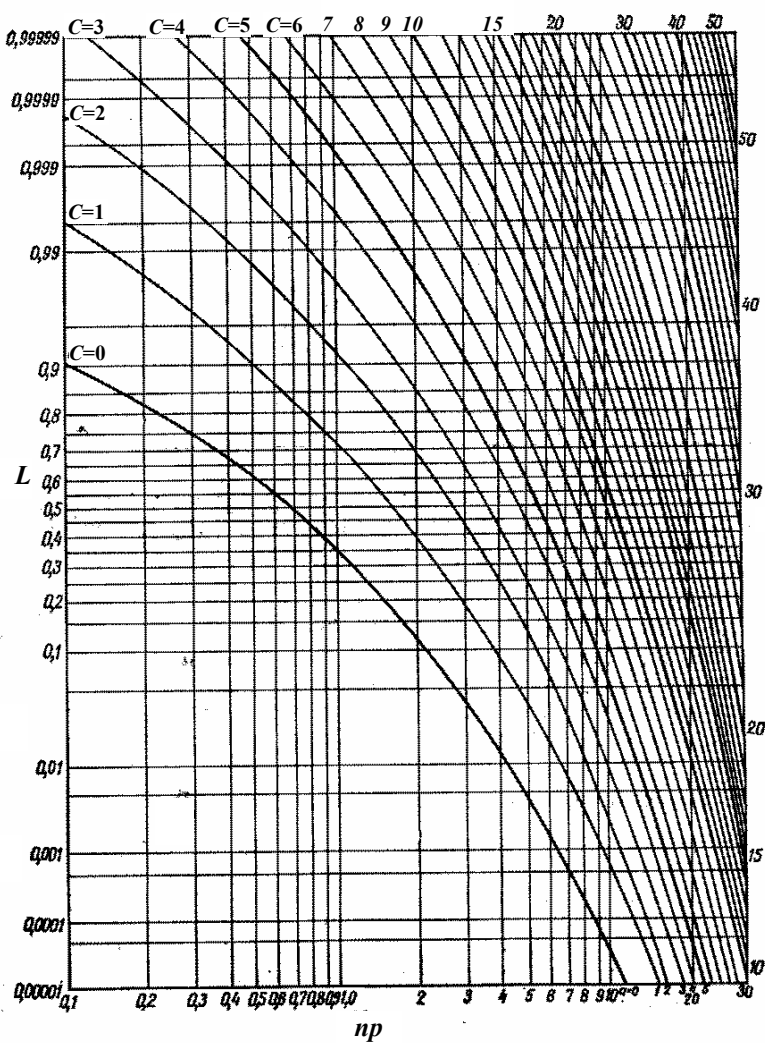


Рис.6.3. Номограмма для расчета объема выборки



- принять партию;
- забраковать партию;
- продолжить контроль.

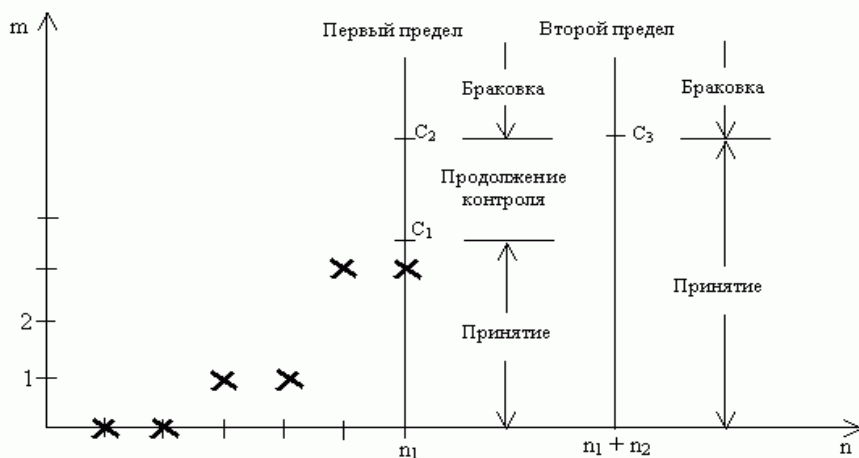


Рис.6.4. Метод двукратной выборки

Контроль заканчивается, когда принимается первое или второе решение.

При использовании данного метода сравнивают величину  $\gamma$ , называемую отношением правдоподобия, с величинами  $\frac{\beta}{1-\alpha}$  и  $\frac{1-\beta}{\alpha}$ , причем, если

$$\gamma \geq \frac{1-\beta}{\alpha} \text{ - партия бракуется;} \quad (6.1)$$

$$\gamma \leq \frac{\beta}{1-\alpha} \text{ - партия принимается;} \quad (6.2)$$

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < \gamma < \frac{1-\beta}{\alpha} \text{ - контроль продолжается.} \quad (6.3)$$

В случае распределения дефектных изделий по закону Пуассона (что имеет место при  $p = \frac{m}{n} < 0.1$ ) отношение правдоподобия будет выражаться через плотности распределения числа дефектных изделий в выборке  $f(m, \lambda)$

$$\gamma = \frac{f(m, \lambda_2)}{f(m, \lambda_1)} = \frac{\frac{1}{m!} (n \cdot p_\beta)^m \cdot e^{-(n \cdot p_\beta)}}{\frac{1}{m!} (n \cdot p_\alpha)^m \cdot e^{-(n \cdot p_\alpha)}}, \quad (6.4)$$

где  $\lambda_1 = m \cdot p_\alpha$  и  $\lambda_2 = n \cdot p_\beta$  - математические ожидания числа дефектных изделий в выборке  $n$  с учетом вероятностных ошибок  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно.

При контроле каждого последующего изделия в выборке границы для соотношения правдоподобия не меняются, меняются лишь само соотношение. Это позволяет свести метод последовательного анализа к элементарно простым алгоритмам.

Прологарифмировав выражение (6.4) и разрешив полученное уравнение относительно  $m$ , получим выражения для определения границ зоны приемки и зоны браковки партии изделий:

$$m_H = \frac{A + n \cdot p_\alpha \left( \frac{p_\beta}{p_\alpha} - 1 \right)}{\ln \frac{p_\beta}{p_\alpha}}; \quad (6.5)$$

$$m_B = \frac{B + n \cdot p_\alpha \left( \frac{p_\beta}{p_\alpha} - 1 \right)}{\ln \frac{p_\beta}{p_\alpha}}, \quad (6.6)$$

где  $A = \ln \frac{\beta}{1 - \alpha}$ ,  $B = \ln \frac{1 - \beta}{\alpha}$ .

В соответствии с уравнениями (6.5) и (6.6) построим в системе координат  $\{m, n\}$  прямые для  $m_H$  и  $m_B$  (рис. 6.5). Эти прямые параллельны, по-

скольку их угловые коэффициенты равны и разделяют плоскость системы координат на три зоны: приемки, браковки и продолжения контроля.

Если опытная точка (координаты которой определяются по нарастающему итогу величин  $m$  и  $n$ ) попадает в зону браковки, то проверку прекращают, а партию изделий бракуют.

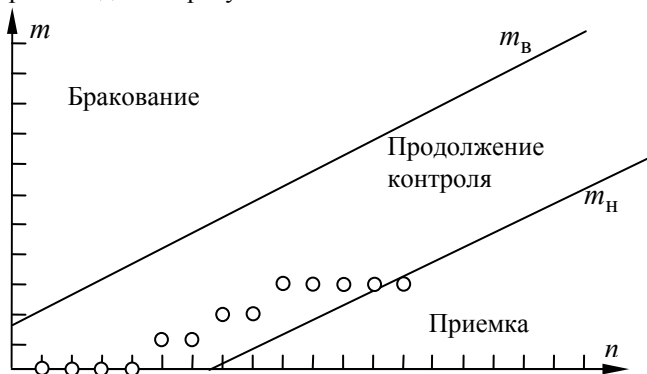


Рис.6.5. Метод последовательного анализа

### Порядок выполнения работы

1. Получить вариант задания (табл. 6.1), проанализировать исходные данные и рассчитать недостающие характеристики, пользуясь номограммой (рис.6.2). В дальнейшем пп.2...6 выполнять на ЭВМ в соответствии с инструкцией к «Программе» работы на ЭВМ.

2. По заданному варианту построить оперативную характеристику по четырем характерным точкам.

3. Проконтролировать  $n$  резисторов по методу однократной выборки. Сделать вывод по результатам контроля.

4. Проконтролировать  $n_1$  резисторов 1-й выборки по методу двукратной выборки. По результатам контроля принять решение.

5. Проконтролировать  $n_2$  резисторов 2-й выборки (если принято соответствующее решение по п. 4) и сделать выводы.

Таблица 6.1

| № вари-<br>анта | $P_\alpha$ | $P_\beta$ | $\alpha$ | $\beta$ | $c_1$ | $c_2$ | $c_3=c_2$ | $A$   | $B$  | $\ln \frac{P_\beta}{P_\alpha}$ |
|-----------------|------------|-----------|----------|---------|-------|-------|-----------|-------|------|--------------------------------|
| 1               | 0.01       | 0.06      | 0.05     | 0.1     | 1     | 2     | 2         | -2.25 | 2.89 | 1.8                            |
| 2               | 0.03       | 0.07      | 0.15     | 0.2     | 1     | 2     | 2         | -1.45 | 1.67 | 0.85                           |
| 3               | 0.006      | 0.01      | 0.1      | 0.2     | 0     | 1     | 1         | -1.5  | 2.08 | 3.0                            |
| 4               | 0.02       | 0.04      | 0.02     | 0.1     | 0     | 1     | 1         | -2.28 | 3.8  | 0.7                            |
| 5               | 0.1        | 0.2       | 0.02     | 0.06    | 2     | 3     | 3         | -2.97 | 3.86 | 0.7                            |
| 6               | 0.001      | 0.06      | 0.05     | 0.1     | 1     | 2     | 2         | -2.25 | 2.89 | 3.9                            |

6. Проконтролировать исследуемую партию резисторов методом последовательного анализа:

6.1. Рассчитать значения границ зоны приемки  $m_H$  и зоны браковки  $m_B$  по формулам (6.5) и (6.6).

6.2. Построить предельную диаграмму в соответствии с рис. 6.5 и рассчитанными значениями границ  $m_H$  и  $m_B$ .

6.3. Поочередно контролируя резисторы, фиксировать и заносить на график рис. 6.5 количество дефектных резисторов  $m$ . По расположению точек  $(m, n)$  принимать решение о принятии или браковке партии резисторов или продолжении контроля.

7. Полученные в п.6 результаты сравнить с результатами контроля этой же партии резисторов двумя предыдущими методами. Сделать выводы по всем трем методам статистического контроля качества партии резисторов.

8. Повторить пп. 4...7 для нового допуска на резисторы (по заданию преподавателя).

9. Оформить отчет о выполненной работе.

Работа может выполняться на ЭВМ. При этом все изучаемые процессы имитируются на ЭВМ (построение графиков, выдача справочной и контрольной информации). При использовании в работе ЭВМ необходимо руководствоваться специально разработанным руководством пользователя.

## **Содержание отчета**

1. Краткое описание работы (цель, основные методы и задание).
2. Оперативная характеристика для метода однократной выборки.
3. Диаграммы методов однократной и двукратной выборок.
4. Предельная диаграмма метода последовательного анализа.
5. Результаты контроля по всем трем методам статического контроля качества резисторов.
6. Выводы о проделанной работе.

## **Контрольные вопросы**

1. Дайте сравнительную характеристику основных путей реализации выборочного контроля качества продукции.
2. Назовите основные методы приемочного статистического контроля качества изделий и дайте их краткую характеристику.
3. Поясните принцип метода однократной выборки; метода двукратной выборки; метода последовательного анализа.
4. Что представляет собой идеальная оперативная характеристика?
5. Как построить оперативную характеристику выборочного контроля по характерным точкам?
6. Как рассчитывается объем выборки для контроля по методу однократной выборки? По методу двукратной выборки?
7. Нарисуйте схему приемочного контроля по методу последовательного анализа и поясните методику принятия решения по результатам контроля.
8. Как рассчитать и построить границы зон приемки и браковки для контроля по методу последовательного анализа?

## **Библиографический список**

1. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. – М.: Мир, 1970. С. 302-316.
2. Коуден Д. И. Статистические методы контроля качества. – М.: Физматиздат, 1961.

## **Работа 7. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЭС И БВС**

*Цель работы* – изучить методику имитации технологических процессов (ТП) и получить практические навыки в разработке имитационной модели (ИМ) для параметрической оптимизации отдельных технологических операций.

### **Краткие теоретические сведения**

Разработка новых ТП наряду с основной задачей преследует цель выбора наиболее эффективных методов, средств и оборудования при оптимальной последовательности технологических и контрольных операций. Достижение этой цели является основным содержанием структурной оптимизации, обеспечивающей оптимальную стратегию реализации конкретного ТП. Задачи структурной оптимизации решаются различными методами (динамического программирования, дискретным принципом максимума, Монте-Карло и др.).

Эти методы реализуются с помощью математического моделирования ТП. При наличии математических моделей (ММ) процесс окончательной отработки ТП и его оптимизации с использованием ЭВМ позволяет без применения дорогостоящих натурных экспериментов исследовать поведение сложных технологических систем в различных производственных ситуациях при случайных колебаниях параметров технологических режимов, изменении характеристик законов распределения параметров ЭРЭ, свойств используемых материалов, технологических сред, погрешностей производственного оборудования. Таким образом, натурный эксперимент или реальный ТП заменяют моделью на ЭВМ при наличии соответствующего математического и программного обеспечения. Имитационное моделирование дает возможность оценить многие параметры ТП (точность, надежность, устойчивость, стабильность, производительность, процент выхода годных, себестоимость продукции т.д.), выявить оптимальные режимы работы оборудования, наметить пути внедрения новой технологии, оценить эффективность различных вариантов структуры и методов реализации ТП.

Получение ММ многооперационных и многофакторных ТП, к числу которых, без сомнения, относится большинство процессов изготовления РЭС и ЭВС, представляет существенные трудности. Системный подход к моделированию ТП позволяет разбить задачу моделирования сложных процессов на ряд подзадач меньшего уровня, т.е. на анализ отдельных операций. В таком случае для получения ММ сложной системы необходимо иметь две её составляющие:

- модель каждой операции;
- модель взаимной связи между операциями.

Таким образом, возникает необходимость наряду со **структурной** оптимизацией всей системы перейти к первоначальному решению задачи **параметрической** оптимизации отдельных операций.

В данном случае под структурной оптимизацией понимают решение задач, связанных с выбором наиболее эффективных методов, средств и оборудования при оптимальной последовательности технологических и контрольных операций. Структурная оптимизация представляет собой целенаправленный поиск решений, обеспечивающих наилучшую стратегию реализации ТП как большой сложной системы для конкретных производственных условий. При этом обычно пользуются методами динамического программирования.

Составной частью структурной оптимизации всей системы сложного ТП является параметрическая оптимизация его отдельных операций, которая имеет целью выявления степени и характера влияния отдельных технологических факторов на параметры целевой функции, выбор оптимальных технологических режимов, концентрации технологических сред, основных и вспомогательных материалов и т.д.

Такого рода задачи решаются на основе ММ, имеющих вид полиномов, неизвестные коэффициенты которых вычисляют по экспериментально - статистическим данным. В настоящее время пользуются современными математическими методами планируемого эксперимента с использованием ММ, получаемой методом полного или дробного факторного эксперимента с дальнейшим переходом к моделям второго порядка в результате применения композиционных планов. Обычно на начальном этапе моделирования довольствуются получением линейной модели ТП, используя для этого полный факторный эксперимент (ПФЭ). Учитывая многофакторность ТП, приходится вместо ПФЭ применять дробные реплики от него (ДФЭ). Линейная модель содержит необходимую информацию о градиенте целевой функции.

Изменяя управляемые факторы пропорционально величинам коэффициентов ИМ, осуществляют движение в направлении вектора градиента целевой функции по наиболее крутому пути относительно поверхности отклика.

Условия проведения эксперимента записывают в форме таблицы, называемой матрицей планирования эксперимента. Матрицы планирования ПФЭ или ДФЭ, независимо от числа факторов, включают, все возможные сочетания всех факторов на двух уровнях (верхнем и нижнем) и обладают следующими свойствами:

- **симметричностью** относительно центра эксперимента, которая выражается в том, что алгебраическая сумма элементов столбца каждого фактора по всем строчкам матрицы равна нулю. Симметричность упрощает заполнение матрицы и облегчает вычисление коэффициентов ММ;

- **нормированностью**, выражающейся в том, что сумма квадратов элементов каждого столбца по всем строчкам матрицы равна числу опытов. Это свойство обеспечивает одинаковую точность оценки всех коэффициентов линейной модели, включая коэффициенты парного взаимодействия;

- **ортогональностью**, проявляющейся в том, что алгебраическая сумма почленных произведений элементов любых двух столбцов по всем строчкам равна нулю. Ортогональность обеспечивает вычисление коэффициентов ММ по взаимонезависимым формулам, что позволяет исключить незначимые коэффициенты без пересчета оставшихся;

- **рототабельностью**, характеризующейся одинаковой точностью оценки параметра оптимизации ТП на равных расстояниях от центра эксперимента независимо от направления в К-факторном пространстве. Рототабельность матрицы обеспечивается специальным подбором уровней экспериментальных точек в факторном пространстве (все уровни факторов должны располагаться на сфере одного радиуса).

По достижении области экстремума переходят к описанию поверхности отклика полиномом второй степени. На этом этапе моделирования применяют композиционные планы. Композиционное ортогональное планирование эксперимента (КОПЭ) [1] позволяет отсеивать незначимые коэффициенты полинома без пересчета оставшихся вследствие ортогональности плана, но точность оценки коэффициентов при этом не одинакова, так как матрица КОПЭ не отвечает требованиям нормированности (с наименьшей точностью вычисляются квадратичные эффекты). Поэтому на заключительном этапе моделирования прибегают к помощи композиционного рототабельного планирования эксперимента (КРПЭ) [2], который обеспечивает более вы-



сокую точность оценки коэффициентов и параметра оптимизации в различных направлениях  $K$ -мерного пространства на одинаковых расстояниях от центра плана.

Данная работа посвящена параметрической оптимизации отдельных операций ТП изготовления РЭС и ЭВС. Натуральный эксперимент при этом заменяется имитацией работы производственного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) на ЭВМ.

### Содержание задания

1. Ознакомиться с рекомендуемой литературой, методическими указаниями по выполнению работы и инструкцией к программе работы на ЭВМ.

2. Проанализировать исходную информацию о ТП в соответствии с заданным вариантом. Зафиксировать в отчете названия параметра оптимизации и управляемых технологических факторов (режимов), указать характер экстремума.

3. Выбрать основные уровни  $\tilde{X}_j^0$  и интервалы варьирования факторов  $\Delta\tilde{X}_j$  с учетом технических характеристик производственного оборудования (диапазон изменения режимов и точность их установки).

4. Заполнить бланк матрицы плана для проведения ПФЭ-2<sup>3</sup> с учетом эффектов парного взаимодействия.

5. Имитируя работу на оборудовании с ЧПУ, провести ПФЭ-2<sup>3</sup>. На клавиатуре ЭВМ набрать натуральные численные значения верхних и нижних уровней факторов. Зафиксировать значение параметра оптимизации в последней графе матрицы плана.

6. Рассчитать коэффициенты линейной модели ТП, руководствуясь указаниями к программе "ПФЭ".

7. Провести опыты в центре плана и оценить значимость коэффициентов ММ.

8. Принять решение о необходимости перехода к плану второго порядка и достроить матрицу КРПЭ звездными точками.

9. Имитируя работу на производственном оборудовании с ЧПУ провести эксперимент в звездных точках плана.

10. Запустить программу ROT.EXE и рассчитать оценки коэффициентов ММ ТП в форме полинома второй степени, оценить их значимость и адекватность модели.

11. Запустить программу DSM и выявить оптимальные режимы и экстремум целевой функции ТП диссоциативно-шаговым методом [3].

12. Дать рекомендации по наладке ТП, предварительно выразив экстремальные значения факторов в натуральном масштабе измерения технологических режимов.

### Порядок выполнения работы

1. Каждая бригада студентов выполняет вариант задания, полученный у преподавателя. Ознакомьтесь с инструкцией к программе работы на ЭВМ. Программа предназначена для имитации одной из операций ТП, выполняемой на ЭВМ вместо реального производственного оборудования с ЧПУ.

2. После включения компьютера и запуска программы проведите анализ исходной информации о ТП. Зафиксируйте в отчете вид ТП, название параметра оптимизации, наименование управляемых технологических факторов (режимов) и характер экстремума.

3. Выберите основной уровень варьирования факторов  $\tilde{X}_j^0$  (центр плана) так, чтобы его координаты оказались в центре области определения факторов относительно предельных значений каждого фактора, реализуемом на производственном оборудовании. Расчет координат вести по формуле

$$\tilde{X}_j^0 = \frac{\tilde{X}_{j_{\max}} + \tilde{X}_{j_{\min}}}{2}, j = 1, 2, \dots, \bar{k}. \quad (7.1)$$

Для определения локальной области проведения эксперимента следует выбрать величину интервала варьирования факторов с учетом характерной для данного оборудования точности установки и поддержания на заданном уровне каждого из факторов, руководствуясь формулой

$$\Delta \tilde{X}_j = (\tilde{X}_{j_{\max}} - \tilde{X}_{j_{\min}}) \cdot K_j, \quad (7.2)$$

где  $K_j$  - коэффициент, зависящий от точности оборудования по каждому фактору. Значения коэффициента  $K_j$  в зависимости от уровня точности оборудования  $\delta X_j$  соответственно равны:

- при низкой точности, характеризующейся относительной погрешностью  $\delta X_j = 10\%$ , следует принять широкий интервал варьирования и брать  $K_j = 0,3$ ;

- при средней точности  $\delta X_j = 5\%$  применяют средние интервалы и соответственно берут  $K_i = 0,2$ ;
- при высокой точности фиксирования факторов  $\delta X_j = 1\%$  необходимо воспользоваться величиной  $K_i = 0,1$ .

Далее следует оценить значения верхнего  $\tilde{X}_j(B)$  и нижнего  $\tilde{X}_j(H)$  уровней каждого фактора в соответствии с выражением

$$\tilde{X}_j(B, H) = \tilde{X}_j^0 \pm \Delta \tilde{X}_j. \quad (7.3)$$

Полученные результаты внести в соответствующие графы бланка матрицы (табл. 7.1).

4. Для реализации опытов следует заполнить первые восемь строчек матрицы полного факторного эксперимента (ПФЭ) по форме табл. 7.1. В целях простоты верхний и нижний уровни факторов обозначают соответственно как +1 и -1; столбцы парных взаимодействий заполняют путем перемножения соответствующих элементов столбцов управляемых факторов с учетом их знаков.

5. В соответствии с матрицей плана провести эксперимент, имитируя работу на оборудовании с ЧПУ. Для исключения влияния неуправляемых доминирующих факторов на результаты эксперимента необходимо соблюдать случайный порядок проведения опытов. Последовательность проведения опытов задается программой. На экране высвечивается:

"Опыт №X и обозначение первого фактора".

В соответствии с этим номером, руководствуясь соответствующей строкой матрицы, наберите последовательно **натуральные значения верхних (если в матрице плана в этой строке (+1) или нижних (-1) уровней факторов)**. После набора численных значений каждого фактора нажимать клавишу [ENTER], при этом в случае неправильного набора исходных данных на экране появится надпись "Ошибка ввода", после чего следует выявить и устранить ошибку. При правильном наборе на экране появится символ второго фактора  $\tilde{X}_{2X} =$ , что является сигналом для ввода соответствующего натурального значения этого фактора путем нажатия [ENTER]. При благополучном исходе ввода данных после набора величины  $\tilde{X}_{3X} =$



для данной строки появляется информация о величине параметра оптимизации  $Y_i$  и одновременно указатель следующей строки матрицы.

Описанные действия повторить последовательно для восьми опытов, характерных для ПФЭ-2<sup>3</sup>. Полученные значения параметра оптимизации  $Y_i$  для всех строчек зафиксировать в соответствующей графе бланка матрицы.

6. Для расчета коэффициентов ММ по данным ПФЭ необходимо вызвать на экран файл "Матрица плана КРПЭ". На экране воспроизводится копия бланка матрицы. Необходимо заполнить левую верхнюю часть матрицы полученными данными об основных, верхних и нижних уровнях факторов, интервалах варьирования. Заполнить первые восемь строчек столбца по полученным экспериментальным данным. В строке "Комментарии" указать номер выбранного варианта "вариант №-XX" (например, 01, 02, 03,...,12). Запустить программу "ПФЭ". Программа осуществляет расчет коэффициентов ММ в виде полинома первой степени, включая парные взаимодействия.

В основе расчетов коэффициентов лежат формулы:

для свободного члена

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^8 X_{0i} \cdot Y_i}{8}; \quad (7.4)$$

для линейных эффектов

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^8 X_{ji} \cdot Y_i}{8}; \quad (7.5)$$

для парных взаимодействий:

$$b_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^8 (X_j \cdot X_u)_i \cdot Y_i}{8}. \quad (7.6)$$

7. Для оценки дисперсии воспроизводимости опытов необходимо провести шесть опытов в центре плана. С этой целью нужно, имитируя работу на производственном оборудовании с ЧПУ, последовательно для строк матрицы №№15...20 набрать **численные натуральные значения основного уровня каждого фактора**, клавишей [ENTER] вызвать на экран соответ-

вующие значения параметра оптимизации  $Y_0$ . Полученные данные внести в отчет (матрицу плана), а также в копию бланка матрицы на экране дисплея. Выбрав опцию "оценка значимости коэффициентов", рассчитать:

а) среднее значение:

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^6 y_{0i}}{6}; \quad (7.7)$$

б) дисперсию воспроизводимости:

$$S_{\text{ВП}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{20} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2}{5}; \quad (7.8)$$

с) значимые коэффициенты должны удовлетворять критерию Госсета–Стьюдента при  $p = 0,95$  и  $N = 8$ ,  $t = 2,31$ :

$$b_{j(ju)} \geq \frac{t \cdot S_{\text{ВП}}}{\sqrt{N}} = 0,816 \cdot S_{\text{ВП}}. \quad (7.9)$$

Коэффициенты, не удовлетворяющие требованию, исключаются из модели вместе с переменными. На экран выводится ММ с численными значениями коэффициентов.

8. Решение о необходимости перехода к плану второго порядка следует принять, предварительно проверив значимость квадратичных эффектов по результатам, полученным при реализации плана ПФЭ-2<sup>3</sup> и опытов в центре плана.

Квадратичные эффекты значимы и, следовательно, подлежат экспериментальной оценке, если выдерживается требование

$$|b_0 - \bar{y}_0| > t_{kp} \cdot S_{\text{ВП}} \cdot \sqrt{\frac{n_0 + \gamma \cdot N}{n_0 \cdot N}}, \quad (7.10)$$

где  $b_0$  – свободный член линейного полинома;

$\bar{y}_0$  – среднее значение параметра оптимизации в центре плана;

$t_{кр}$  – значение критерия Госсета-Стьюдента при  $p=0,95$  и числе степеней свободы  $f_0=(n_0-1)=5$ ,  $t_{кр}=2,571$ ;

$S_{ВП}$  - дисперсия воспроизводимости для опытов в центре плана;

$n_0$  - число опытов в центре плана,  $n_0=6$ ;

$\gamma$  - число повторных опытов в каждой строке матрицы плана,  $\gamma=1$ ;

$N$  - общее число опытов для КРПЭ при  $K=3$ ,  $N=20$ .

С учетом приведенных значений, критерий принимает вид

$$|b_0 - \bar{y}_0| > 1,197 \cdot S_{ВП} . \quad (7.11)$$

Убедившись в необходимости вычисления коэффициентов, характеризующих квадратичные эффекты, достраиваем матрицу композиционного рототабельного плана эксперимента (КРПЭ) звездными точками.

При  $k = 3$  плечо звездных точек для КРПЭ составляет  $\alpha = \pm 1,682$ . Элементы квадратичных столбцов в этих точках соответственно равны 2,829. Заполните строки 9...14 матрицы координатами звездных точек в кодированной форме. Для проведения экспериментов в звездных точках к ранее рассчитанным значениям уровней управляемых факторов следует добавить еще два уровня звездных точек в натуральном масштабе. Расчет этих уровней производится по формуле

$$\tilde{X}_{н,в}^* = \tilde{X}_j^0 \pm 1,682 \cdot \Delta \tilde{X}_j . \quad (7.12)$$

9. Имитируя работу на производственном оборудовании с ЧПУ, провести эксперимент в звездных точках. С этой целью для опыта №9 набрать в натуральной форме численное значение верхнего уровня звездной точки первого фактора  $\tilde{X}_{19}^*(B)$  и нажать [ENTER], набрать основной уровень второго фактора  $\tilde{X}_{29}^*(0)$  - [ENTER] и соответственно  $\tilde{X}_{39}^*(0)$  - [ENTER], зафиксировать на бланке матрицы значение  $Y_9$  параметра оптимизации опыта. Для опыта №10 последовательно ввести  $\tilde{X}_{110}^*(H)$ ,  $\tilde{X}_{210}^*(0)$ ,  $\tilde{X}_{310}^*(0)$ , отметить величину параметра оптимизации  $Y_{10}$ . Аналогично проделать опыты в остальных звездных точках, не допуская ошибки в установке уровней факторов для звездных точек.

10. Запустить программу ROT.EXE для расчета параметров ММ второго порядка по результатам эксперимента. После вызова окна редактора в столбец 1 ввести, соблюдая нумерацию строк, все экспериментальные данные параметра оптимизации. Выполняя все команды, предусмотренные программой, провести расчеты коэффициентов ММ, оценить их значимость и проверить адекватность модели экспериментальным данным. Результаты расчета и ММ с численными значениями коэффициентов записать в отчет по работе.

11. Для выявления оптимальных режимов и экстремума целевой функции ТП запустить программу DSM. Руководствуясь правилами работы с программой, ввести исходные данные (коэффициенты полинома) и провести решение задачи оптимизации ТП. Полученное расчетным путем значение параметра оптимизации в результате установки экстремальных значений факторов в ММ сравнить с экспериментальными данными и принять окончательное решение о выборе оптимальных режимов (по расчетным или экспериментальным данным).

12. Рекомендации по наладке ТП на оптимальные режимы дать с учетом их перевода из кодированной (безразмерной) в натуральную форму представления согласно выражению

$$\tilde{X}_j = \tilde{X}_j^0 + \tilde{X}_j^{\Delta} + \Delta\tilde{X}_j, j = 1, 2 \text{ и } 3, \quad (7.13)$$

где  $\tilde{X}_j^0$  - основной уровень фактора в натуральном масштабе;  $\tilde{X}_j^{\Delta}$  - экстремальное значение фактора в нормированной (безразмерной системе);  $\Delta\tilde{X}_j$  - интервал варьирования фактора в натуральном масштабе.

В выводах по работе отметить, на сколько и как необходимо изменить значения режимов (увеличить или уменьшить) относительно основного уровня для достижения экстремума целевой функции ТП.

### Содержание отчета

1. Исходные данные о ТП (управляемые технологические режимы, параметр оптимизации, характер экстремума) и производственном оборудовании (пределы изменения режимов и точность).
2. Матрица композиционного рототабельного планирования эксперимента (КРПЭ) на бланке с экспериментальными данными.
3. Линейная модель ТП с учетом парных взаимодействий.



4. Результат принятия решения о необходимости перехода к плану второго порядка. Расчет критерия перехода по формуле (7.10).

5. Результаты расчета параметров ММ ТП методом КРПЭ, ММ в форме полинома второй степени.

6. Однофакторные модели и результаты поиска экстремальных режимов с использованием диссоциативно-шагового метода (ДШМ).

7. Рекомендации по наладке ТП на оптимальные режимы, представленные в натуральной форме выражения факторов.

8. Выводы об изменении факторов относительно основного их уровня в начале эксперимента.

### **Контрольные вопросы**

1. Кодирование факторов, правила заполнения матриц планирования экспериментов.

2. Основные свойства матриц планирования экспериментов.

3. Выбор основного уровня и интервалов варьирования факторов.

4. Расчет коэффициентов ММ по экспериментальным данным.

5. Оценка значимости коэффициентов и адекватности ММ экспериментальным данным.

6. Структура композиционных планов проведения экспериментов.

7. Методы оптимизации ТП. Сущность диссоциативно-шагового метода.

8. Переход от кодированной формы значений факторов к натуральному масштабу их измерения.

9. Принятие решений по полученной ММ ТП.

10. Сущность структурной и параметрической оптимизации ТП.

### **Библиографический список**

1. Сахаров М.А., Федотов Л.М. Расчетно-аналитический и корреляционный методы анализа, производственных погрешностей изготовления радиоэлектронных изделий. – М.: Изд-во МАИ, 1995.

2. Боченков Ю.И., Сахаров М.А., Федотов Л.М. Оценка технологической точности при проектировании РЭС и БВС. – М.: Изд-во МАИ, 1994.

3. Сахаров М.А. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления РЭС и БВС. – М.: Изд-во МАИ, 1992.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Работа 1. Изучение технологического процесса изготовления коммутационных структур РЭА на основе печатных плат .....                                           | 3  |
| Работа 2. Исследование точности и стабильности технологических процессов изготовления МЭА.....                                                                | 18 |
| Работа 3. Технологическая и функциональная подгонка пленочных элементов ГИС.....                                                                              | 26 |
| Работа 4. Методы оптимизации процесса регулировки радиоаппаратуры .....                                                                                       | 39 |
| Работа 5. Математическое моделирование технологического процесса регулирования РЭС с использованием трехуровневых композиционных планов второго порядка ..... | 54 |
| Работа 6. Изучение статистических методов приемочного контроля микроэлектронных устройств .....                                                               | 67 |
| Работа 7. Имитационное моделирование и параметрическая оптимизация операций технологических процессов изготовления РЭС и БВС.....                             | 78 |

Тем.план 2006, поз.8

Борисов Валентин Федорович  
Сахаров Михаил Алексеевич,  
Федотов Леонид Михайлович  
Филин Георгий Витальевич  
Чайка Юрий Владимирович

## ТЕХНОЛОГИЯ РЭС И ЭВС

Редактор *Р.Н. Фурсова*  
Компьютерная верстка *Ю.В. Чайка*

Подписано в печать

Бум. офсетная. Формат 60х84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. . Уч-изд. л. 5,75. Тираж экз.

Зак. . С. .

Отпечатано с готового оригинал-макета

Издательство МАИ

«МАИ», Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Типография Издательства МАИ

«МАИ», Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**