

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электронной техники и технологии

**ДИАГНОСТИКА  
ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию  
в области информатики и радиоэлектроники  
в качестве учебно-методического пособия  
для специальности 1-36 04 01 «Электронно-оптические  
системы и технологии»*

Минск БГУИР 2014

УДК 621.3.085.33(076.5)

ББК 32.842-5я73

Д44

Авторы:

А. П. Достанко, Д. А. Голосов, С. М. Завадский,  
А. М. Русецкий, И. В. Свадковский, В. В. Боженков

Рецензенты:

кафедра конструирования и производства приборов  
Белорусского национального технического университета  
(протокол №11 от 03.05.2012 г.);

ведущий инженер Научно-производственного  
республиканского унитарного предприятия  
«КБТЭМ-ОМО» Я. И. Точицкий

Д44 **Диагностика** оптоэлектронных устройств и систем. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие / А. П. Достанко [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – 70 с.

ISBN 978-985-488-937-5.

Пособие содержит лабораторные работы по исследованию характеристик оптронов, юстировки оптических резонаторов, изучению системы управления роботом на базе микроконтроллера МКП-1, определению толщины тонкопленочных покрытий с помощью оптического интерферометрического профилометра, исследованию асинхронных исполнительных двигателей с полым немагнитным ротором.

Пособие ориентировано на закрепление и углубление теоретических знаний, приобретение практических навыков работы с диагностическим и технологическим оборудованием и специализированной оснасткой.

УДК 621.3.085.33(076.5)  
ББК 32.842-5я73

ISBN 978-985-488-937-5

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Лазерная юстировка оптического резонатора.....4

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Программное управление роботом-манипулятором.....13

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Исследование индукционных систем синхронной связи .....29

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Определение толщины тонкопленочных покрытий  
оптическим интерферометрическим профилометром .....42

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

Исследование асинхронных исполнительных двигателей  
с полым немагнитным ротором.....58

Библиотека БГУИР

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## Лазерная юстировка оптического резонатора

### Цель работы

Изучить методы юстировки резонаторов He-Ne лазеров и исследовать условия генерации газовых оптических квантовых генераторов (ОКГ).

### Теоретические сведения

#### Описание конструкции ОКГ типа ЛГ-75

Газовый ОКГ ЛГ-75 предназначен для использования в качестве источника когерентного излучения в системах связи, телевидения, телеуправления и т. д.

ОКГ ЛГ-75 (рис. 1.1) состоит из оптического резонатора и активного элемента. Оптический резонатор образован сферическим 1 и плоскими 2 зеркалами, закрепленными в стаканах 3. Стаканы 3 жестко закреплены винтами 4 во фланцах 5 и 6 и связаны между собой тремя направляющими инваровыми стержнями 7. Фланцы 5 и 6 крепятся к инваровым стержням 7 винтами 8 через шайбы 9. Наличие шайб 9 позволяет изменять положение фланцев 5 и 6 с зеркалами 1 и 2 относительно оси оптического резонатора путем вращения в небольших пределах юстировочных винтов 8. Между инваровыми стержнями с помощью фланцев 10 закреплен активный элемент – газоразрядная трубка 12 с подогревным катодом 13 и анодом 14, заполненная смесью неона и гелия. Торцы газоразрядной трубки отшлифованы под углом Брюстера и закрыты выходными окнами 15. Пространство между выходными окнами 15 и зеркалами 1 и 2 герметизировано с помощью резиновых прокладок 16, прижимаемых гайками 17 к стаканам 3. Оптический резонатор с активным элементом помещен в защитный корпус 18 и жестко в нем закреплен. Корпус 18 закрыт с торцов крышками 19 и 20, которые крепятся к фланцам 21 винтами 22. Высокое и накальное напряжения к газоразрядной трубке 12 подводятся через разъем 23. Выход излучения осуществляется со стороны плоского зеркала 2. Для крепления прибора на корпусе 18 имеются скобы 24 с резьбовым отверстием в каждой из них.

Технические характеристики ЛГ-75:

1. Длина волны излучения – 0,6328 мкм.
2. Мощность излучения – не менее 250 мВ.
3. Угловая расходимость луча – не более 10'.

4. Долговечность активного элемента – не менее 500 часов.
5. Напряжение накала катода – 6,3 В.
6. Напряжение горения – 2300 – 2500 В.
7. Оптимальный ток разряда – 0,04..0,06 А.
8. Максимальная потребляемая мощность – 400 Вт.
9. Вес прибора – не более 12 кг.
10. Габаритные размеры прибора – 1170×90×90 мм.

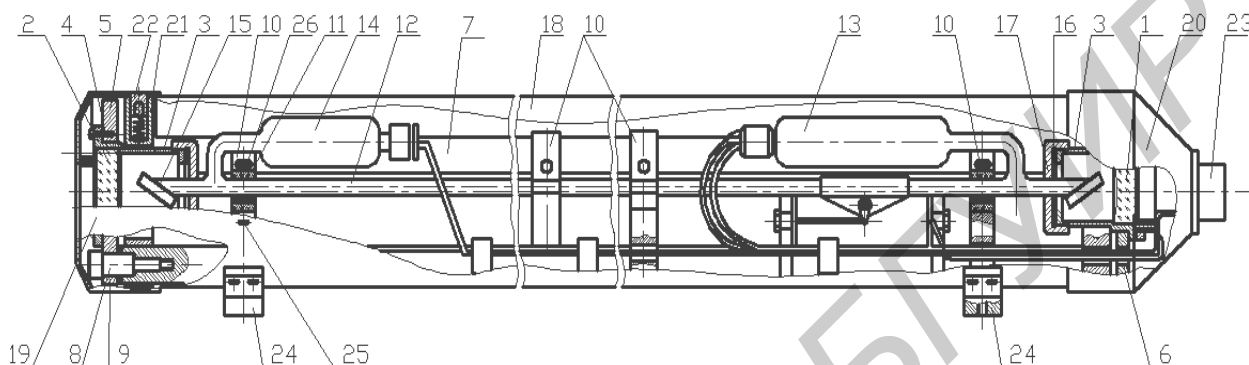


Рис. 1.1. Конструкция ОКГ ЛГ-75

### **Зависимость параметров генерации от точности резонатора**

Под юстировкой резонатора понимают точное выставление и ориентировку зеркал, активного тела и других элементов внутри резонатора. В общем случае оптический резонатор считается отъюстированным, если выполнены следующие условия:

- центры зеркал и их центры кривизны находятся на одной оси резонатора;
- ось активного элемента и ось резонатора совпадают.

От точности юстировки оптических элементов лазера в значительной степени зависят и выходные параметры генерации. Как показывают опыты, энергетические, спектральные и другие характеристики лазерного излучения очень чувствительны к разъюстировке зеркал резонатора. Изменяется также модовая структура и пространственная индикатриса излучения в ближней зоне. При разъюстировке резонатора апертурная диафрагма, роль которой может играть оправа зеркала или сечение активного элемента, все больше будет ограничивать пучок излучения. Дифракционные потери будут увеличиваться, и при некоторой критической величине угла разъюстировки генерация прекратится. Для оценки угла разъюстировки можно исходить из такого критерия: расстоя-

ние от оси резонатора до края апертурной диафрагмы не должно быть меньше размера продольной моды  $TEM_{00}$ .

В общем случае для сферического неконфокального резонатора с параметрами, показанными на рис. 1.2 критический угол разъюстировки определяется по формуле

$$\beta = \frac{a - r_{TEM_{00}}}{XL}, \quad (1.1)$$

где  $a$  – радиус активного элемента;

$L$  – длина резонатора.

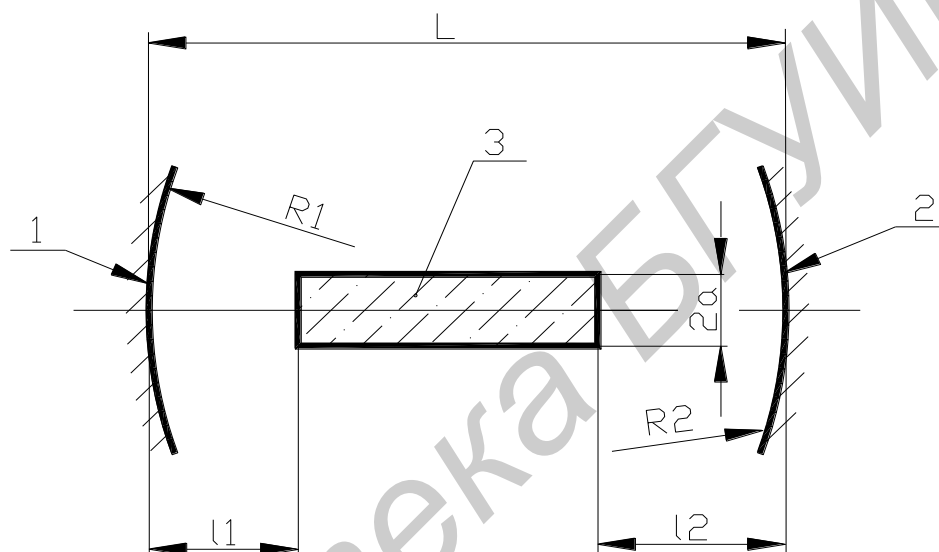


Рис. 1.2. Схема оптического резонатора:

1 – глухое зеркало; 2 – выходное зеркало; 3 – активная среда

$$r_{TEM_{00}} = \sqrt{\frac{R_{\text{эк}} \cdot \lambda}{2\pi} \left[ 1 + \left( \frac{L}{R_{\text{эк}}} \right)^2 \right]}, \quad (1.2)$$

$$R_{\text{эк}} = 2L \frac{\sqrt{q_1 q_2 (1 - q_1 q_2)}}{q_1 + q_2 - 2q_1 q_2}, \quad (1.3)$$

$$q_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, \quad q_2 = 1 - \frac{L}{R_2}. \quad (1.4)$$

$$q_1 = q_2 = q, \quad R_{\text{эк}} = L \sqrt{\frac{1+q}{1-q}}, \quad (1.5)$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 - \frac{l_2}{R_{\text{эк}}} \\ q_2 - \frac{l_1}{R_{\text{эк}}} \end{pmatrix} / 1 - q_1 q_2, \quad (1.6)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – расстояния от торцов активного элемента до соответствующих зеркал резонатора, м;

$\lambda$  – длина волны основной моды, м;

$R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны зеркал, м;

$R_{\text{эк}}$  – радиус образованного кольца на экране, м.

В расчет берется наибольшее из двух уравнений значение  $X$ .

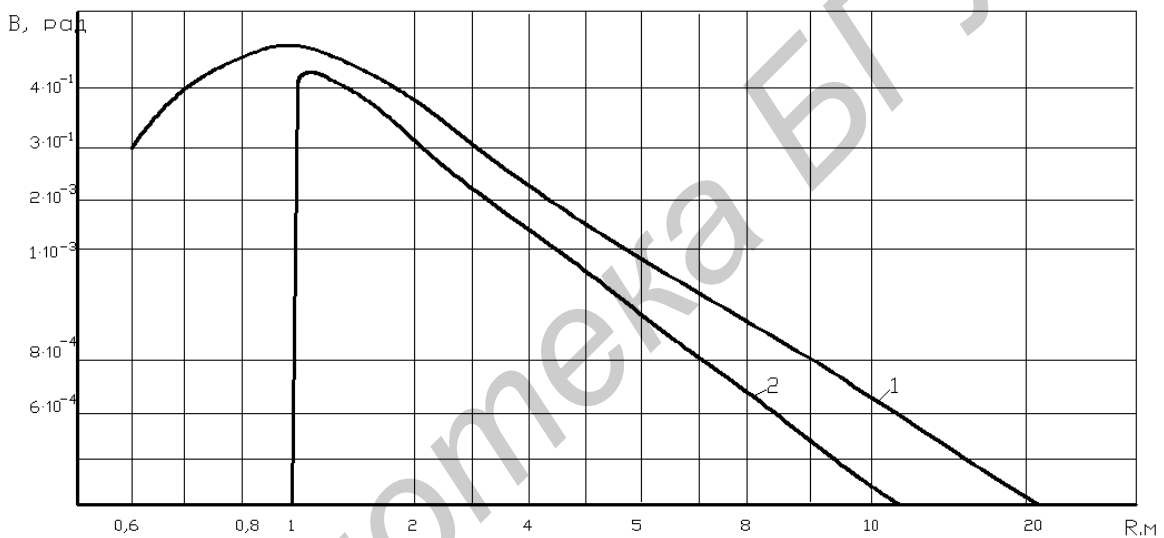


Рис. 1.3. Зависимость критического угла разъюстировки от радиуса кривизны зеркал:  
1 – для сферического резонатора; 2 – для плоско-сферического резонатора

В случае плоского резонатора критический угол для  $TEM_{00}$  находят из тех соображений, что разъюстировка эквивалентна внесению дополнительных потерь

$$\alpha = \left( \frac{4\pi^2}{3} \right) / \lambda / a \beta^2. \quad (1.7)$$

Приравнявая (1.7) к потерям на зеркалах, получаем

$$4\pi^2 / 3 \lambda / a \beta^2 = 1 - R,$$

откуда

$$\beta = \lambda / 2\pi a \sqrt{3(1-R)}, \quad (1.8)$$

где  $R$  – произведение коэффициентов отражения зеркал.

Таким образом, для плоского резонатора критический угол разъюстировки значительно меньший, чем для конфокального резонатора.

### Методы юстировки оптических резонаторов

Главная цель юстировки – добиться генерации. Дальнейшие коррективы производятся легко – по максимуму энергии генерации или по картине распределения поля излучения. Рассмотрим распространенные методы юстировки.

#### Автоколлимационный метод

При использовании автоколлиматора совмещают изображения автоколлимационной метки от заднего (глухого) зеркала при последовательной установке активного тела и других элементов резонатора (так называемый метод на просвет) и, наконец, выходного зеркала. В случае газовых лазеров активный элемент (трубка с газом) должен быть центрован, ориентирован по оси резонатора. В случае рубиновых лазеров из-за неоднородности кристалла изображение метки размывается, и активный стержень приходится ориентировать совмещением автоколлимационных меток от заднего зеркала, от торца стержня и от выходного зеркала (так называемый метод трех меток). Этот способ имеет недостатки: не учитывается реальное смещение луча из-за градиента коэффициента преломления (после прохождения через кристалл рубина луч может отклоняться на несколько угловых минут): кроме того, невозможно избежать клинообразности стержня. При юстировке методом трех меток порог генерации будет выше (рис. 1.4).

В автоколлимационном методе точность установки определяется увеличением автоколлиматора (рис. 1.5). Если две удаленные точки видны из зрачка объектива автоколлиматора под углом  $\alpha$ , то со стороны окуляра видимый угол будет

$$\alpha' = M\alpha, \quad (1.9)$$

где  $M = f_{об} / f_{ок}$  – угловое увеличение системы.

Так как разрешающая способность глаза  $\alpha = 60''$ , то

$$\alpha_{пр} = 60'' \frac{f_{об}}{f_{ок}}. \quad (1.10)$$



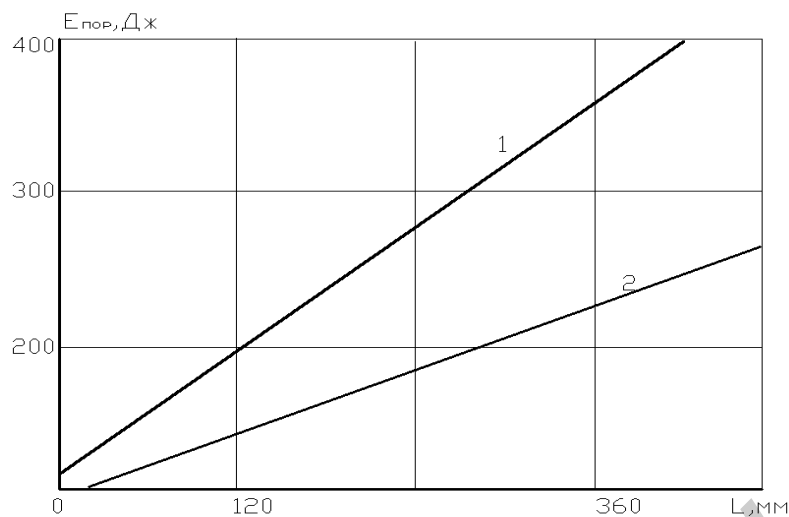


Рис. 1.4. Зависимость пороговой энергии накачки рубинового лазера от длины:  
1 – метод трех точек; 2 – метод на просвет

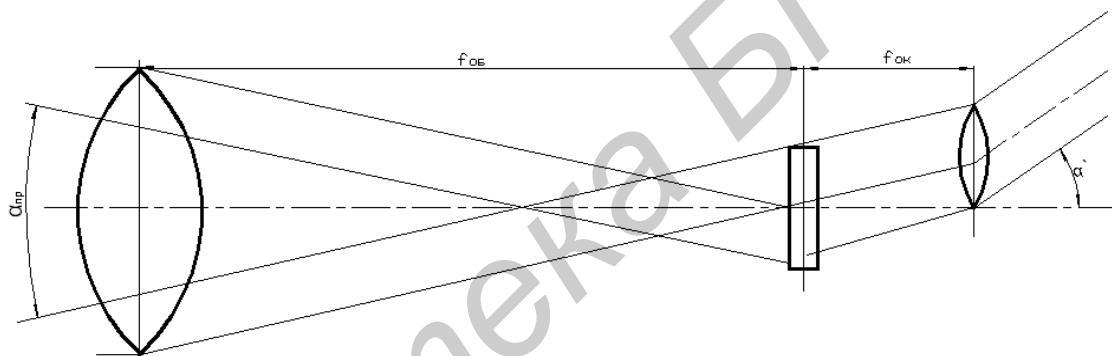


Рис. 1.5. Ход лучей в автоколлиматоре

### Метод оптического рычага

Метод оптического рычага предусматривает применение для юстировочных целей маломощного лазера (рис. 1.6). Луч от лазера 1 через отверстие в зеркале 2 попадает в резонатор (6 – активный элемент), отражается от его зеркал 4 и 5, отражается от зеркала 2 и попадает на экран 3, где наблюдается ряд светлых точек. Если точки исчезли, т. е. совместились с отверстием диафрагмы, то резонатор отъюстирован. Очевидно, точность юстировки зависит от  $L_p$  («плечо оптического рычага»).

### Интерференционный метод

Интерференционный метод (рис. 1.7) заключается в том, что луч от маломощного лазера 1 проходит через отверстие экрана 2 и слаборассеивающую линзу 3, отражается от зеркал резонатора 4 и 5, давая на экране интерференци-

онную картину в виде концентрических колец. Если картина четкая и центрирована относительно источника света, то зеркала параллельны, и резонатор отъюстирован. Данный метод, как и предыдущие, пригоден прежде всего для плоских резонаторов. В случае сферических зеркал их следует диафрагмировать и работать лишь с параксиальными лучами.

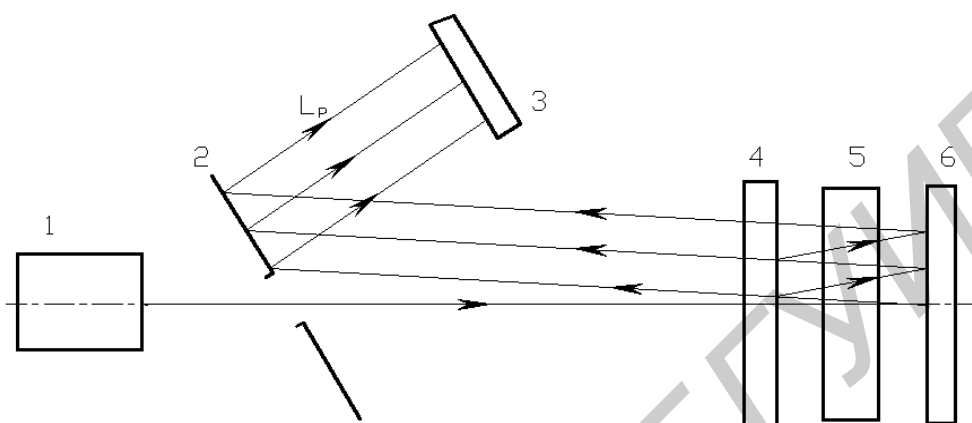


Рис. 1.6. Юстировка методом оптического рычага:

1 – маломощный лазер; 2 – зеркало с отверстиями; 3 – экран; 4, 5 – зеркала резонатора; 6 – активный элемент

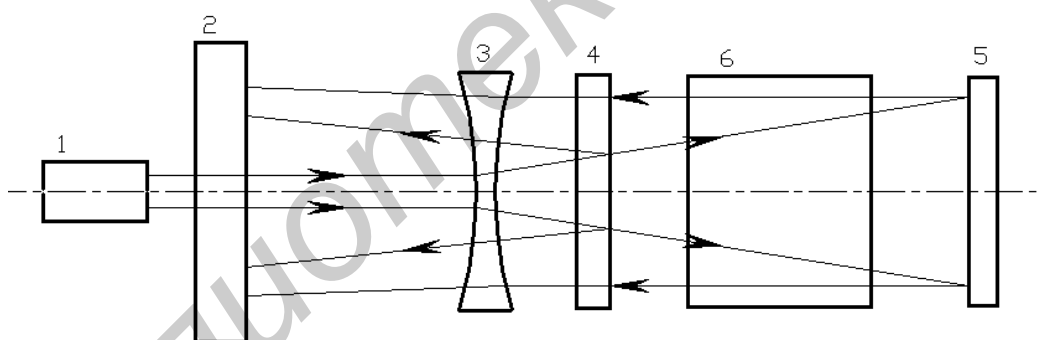


Рис. 1.7. Интерференционный метод юстировки резонатора:

1 – маломощный лазер; 2 – экран; 3 – линза; 4,5 – зеркала; 6 – активный элемент

### Юстировка с помощью диоптрийной трубки

Можно использовать монокуляр, подзорную трубу и т. п., предварительно выставив их на бесконечность. Диоптрийные трубки входят в комплект больших оптических скамей, изготавливаемых серийно. Для маломощных диоптрийных гелий-неоновых лазеров с полуконфокальными резонаторами этот метод применяется наиболее часто. Наблюдения ведут при горении разряда через выходное зеркало **только с применением светофильтра.**

## Порядок выполнения работы

1. Изучить технические описания и условие эксплуатации используемых в работе приборов.

2. Оценить критический угол разъюстировки  $\beta$  для одного из гелий-неоновых лазеров ( $\lambda = 0,6328$  мкм) (табл. 1.1).

Параметры He-Ne лазеров

Таблица 1.1

Лазеры	$L$ , м	$l$ , м	$R_1$ , м	$R_2$ , м	$a$ , см
ЛГ-36А	1,5	1,2	10	$\infty$	0,5
ЛГ-56(ЛГ-55)	0,3	0,25	1	$\infty$	0,1
ЛГ-75	1,0	0,96	2	$\infty$	0,5

3. Установить ОКГ на направляющую из комплекта большой оптической скамьи.

4. Установить на направляющую технологическую оснастку для юстировки оптического резонатора ОКГ методом оптического рычага.

5. Произвести юстировку оптического резонатора ОКГ методом оптического рычага.

6. Демонтировать технологическую оснастку для юстировки оптического резонатора ОКГ методом оптического рычага.

7. Установить на направляющую коллиматор для юстировки оптического резонатора ОКГ.

8. С помощью коллиматора определить остаточный угол разъюстировки по результатам выполнения п. 5.

9. Установить на направляющую технологическую оснастку для юстировки оптического резонатора ОКГ интерференционным методом.

10. Произвести юстировку оптического резонатора ОКГ интерференционным методом.

11. Демонтировать технологическую оснастку для юстировки оптического резонатора ОКГ интерференционным методом.

12. Установить на направляющую коллиматор для юстировки оптического резонатора ОКГ.

13. С помощью коллиматора определить остаточный угол разъюстировки по результатам выполнения п. 9.

14. Сравнить и проанализировать результаты юстировки по пп. 8 и 13.

15. Оформить отчет о выполнении работы.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Чертеж ОКГ.
4. Схемы юстировки ОКГ.
5. Расчет критического угла разъюстировки.
6. Результаты исследований (эпюры излучений и отражений).
7. Результаты вычислений остаточных углов разъюстировки по пп. 8 и 13.
8. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Описать принцип работы и устройство He-Ne лазеров.
2. Описать конструкцию юстировочного узла.
3. Описать методы юстировки оптических резонаторов: автоколлимационный метод, метод оптического рычага интерференционный метод.
4. Юстировка оптического резонатора с помощью диоптрийной трубки.
5. Оптическая схема и принцип работы автоколлиматора.
6. Оптическая схема и принцип работы диоптрийной трубки.

## Литература

1. Погарев, Г. В. Оптические юстировочные задачи : справочник / Г. В. Погарев, Н. Г. Кисилев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 260 с.
2. Основы лазерной техники : учеб. пособие для студ. / К. И. Крылов [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1990. – 316 с.
3. Кэмруков, А. С. Основы методов расчета лазеров : учеб. пособие Ч.1 / под ред. Н. П. Козлова. – М. : МГТУ, 1989. – 224 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### Программное управление роботом-манипулятором

#### Цель работы

Изучить методы управления роботами и особенностей построения систем управления. Изучить принцип работы микроконтроллера, программируемого МКП-1, составить программы управления.

#### Теоретические сведения

Промышленный робот независимо от его назначения, сложности и типа, состоит из двух основных частей: манипулятора и системы управления, в которую входят блоки памяти, логические блоки памяти, логические блоки, пульт управления и др.

В процессе развития роботов и робототехники комплексов, а соответственно и систем управления можно выделить роботы с программным устройством управления, роботы с «очувствлением» и роботы с искусственным интеллектом. Первые из перечисленных роботов выполняют совокупность жестко запрограммированных операций и способны легко перестраиваться на выполнение другого жесткого комплекса операций. Они требуют, чтобы предметы, которыми они манипулируют, находились строго в определенной точке пространства и были ориентированы. Второй тип роботов снабжается различными датчиками, способными информировать о состоянии его элементов механической части. Сигналы датчиков преобразуются и обрабатываются ЭВМ с целью формирования управляющего сигнала. Эти роботы могут изменять программу действий путем переключения или формирования программ из своей памяти. Роботы, имеющие искусственный интеллект, обладают высокой степенью «очувствления», которая позволяет им в восприятии и распознавании обстановки, способны вырабатывать решения, автоматически выбирать оптимальный вариант и осуществлять контроль над операцией.

Системы управления предназначены для формирования логической последовательности действий робота и обеспечения автоматической работы его устройств в соответствии с заданной программой, осуществления связи между действиями самого робота и обслуживаемого им оборудования и контроля над выполнением операций.

Системы управления могут работать по жесткой программе, используемой в основном для двух первых типов роботов, и по гибкой программе. Системы управления с жесткой программой предназначены для выполнения повторяющихся операций в неизменной среде, имеют механическую память и задают движение рабочим органам робота в виде последовательности значений требуемых положений. Жестко программируемые системы управления могут быть цикловыми, позиционными, контурными и контурно-позиционными.

Цикловые системы управления применяются для простейших роботов, работающих по заданному циклу, и для которых фиксация подвижных элементов в заданных точках осуществляется жесткими упорами или с помощью концевых выключателей. Для таких роботов используются системы автоматического управления на базе циклового программирующего устройства со штекерной панелью, барабаном или кнопочным набирателем. Количество программируемых позиций в этом случае доходит до 20–30 и до 50–60 – при использовании аналоговых систем. При цикловом программном управлении последовательность перемещений рабочих органов записывается на штекерной панели или барабане и осуществляется включением предшествующих операций.

Цикловые системы управления достаточно надежны в эксплуатации, просты в наладке, эффективны при использовании роботов на операциях штамповки, прессования, разбраковки, обладают возможностью сохранять информацию при выключении питания, имеют низкую стоимость, но в то же время имеют сравнительно небольшое число команд и не могут хранить обработанную программу вне системы управления.

Позиционные системы управления, в которых рабочий орган («захват») выводится на заданную позицию, имеют большую память, чем цикловые системы управления и позволяют обеспечить высокую точность отработки программ независимо от погрешностей установки жестких упоров. Позиции определяются механическими регулируемыми упорами, аналоговыми датчиками или установкой потенциометров необходимой величины. Использование простейших приводов – пневматического, винтового – создает трудности с промежуточным позиционированием в каждой степени свободы. Информация, поступающая от датчиков позиционных систем, обрабатывается и используется для управления следящим приводом приводов.

Контурные системы управления обеспечивают перемещение рабочего органа по заданному контуру. Они используются для управления роботами при нанесении лакокрасочных покрытий, дуговой сварки, газовой резки и т. д. Широкое применение контурные системы управления нашли в станках с ЧПУ. Датчиками обратной связи в таких системах служат вращающиеся трансформа-

торы, программоносителем – магнитная лента. При хорошо отработанной программе, записанной на магнитной ленте, переналадка робота заключается только в установке новой кассеты с заданной программой. При использовании автономных систем управления, обеспечив их связь с центральной ЭВМ для обмена программами и передачи управляющих команд роботам, возможно создание единой системы централизованного управления участками и цехами. Системы управления на базе ЭВМ осуществляют последовательность выполнения операций оборудованием и согласование работы роботов-манипуляторов по обеспечению вспомогательных операций.

Совокупность достоинств контурных и позиционных систем управления сочетаются в контурно-позиционных системах.

Система управления для адаптации роботов со многими степенями свободы состоит из вычислительной системы, контроллера, периферийного оборудования для ввода – вывода информации, обслуживания и контроля.

Вычислительная система содержит оперативное запоминающее устройство емкостью 50 – 100 Кбайт, процессор, блоки для выработки элементарных команд управления перемещения рабочих органов, канал ввода – вывода цифровой информации, периферийное оборудование (дисплей, пульт управления). Блоки для выработки элементарных команд управления перемещениями включают в себя самостоятельное вычислительное устройство с длиной перерабатываемого слова до 24 бит, аналоговые и цифровые преобразователи, интерфейс с каналом процессора.

Практика показывает, что в массовом и крупносерийном производстве промышленные роботы должны оснащаться цикловыми системами программного управления с незначительной универсальностью в мелкосерийном и индивидуальном – числовыми системами с максимальной универсальностью и переналаживаемостью. Типичным представителем систем управления для простейших роботов является микроконтроллер МКП-1.

Микроконтроллер, программируемый МКП-1, предназначен для циклического двухпозиционного управления манипуляторами и техническим оборудованием.

Областью наиболее эффективного применения микроконтроллера является управление робототехническими комплексами и автоматическими линиями при автоматизации технологических процессов в условиях серийного и мелкосерийного производства, когда требуется развитое программно-логическое управление, оперативная смена управляющих программ, и когда использование стандартных средств вычислительной техники экономически нецелесообразно ввиду их высокой стоимости и сложности обслуживания.

Микроконтроллер МКП-1 – 16 – 0,5 (рис. 2.1) обеспечивает следующие режимы работы:

- 1) под управлением программы (автоматическое управление);
- 2) под управлением команд, показанных с пульта управления (ручное управление);
- 3) пошаговое выполнение программы;
- 4) запись программы в память рабочих программ (программирование);
- 5) просмотр программ (вывод на индикацию содержимого).

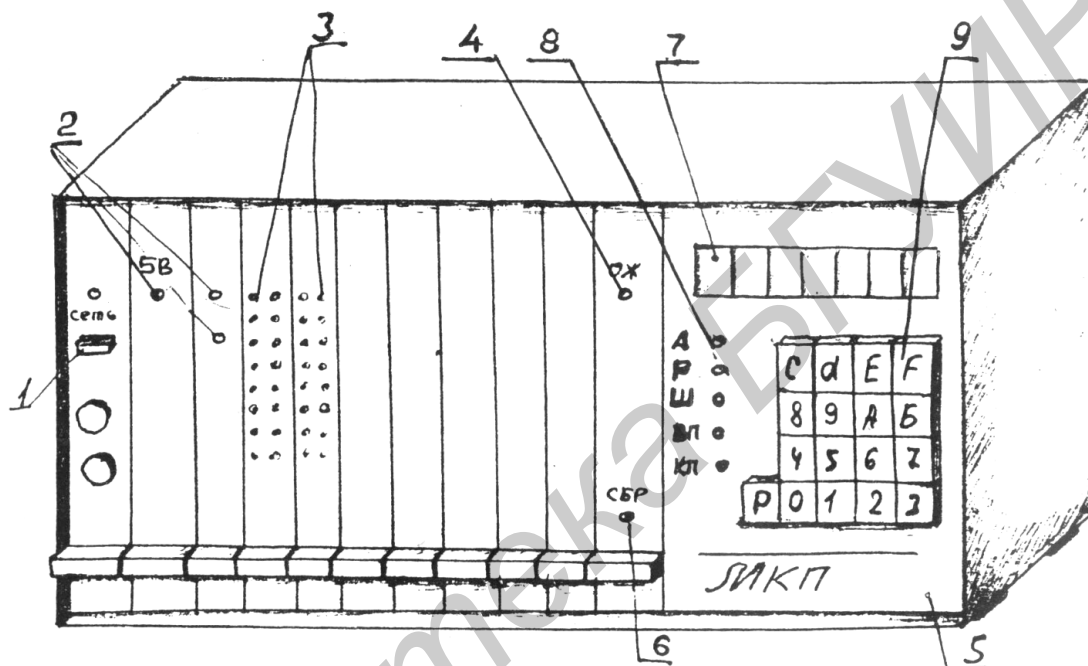


Рис. 2.1. Внешний вид микропроцессора:

- 1 – включение питания; 2 – индикаторы напряжения;
- 3 – индикаторы состояния входов и выходов; 4 – инд. режим ожидания;
- 5 – пульт управления; 6 – кнопка сброса адреса;
- 7 – индикация адреса, кода, операнда; 8 – индикация режима;
- 9 – клавиатура

Микроконтроллер имеет объем памяти 0,5 Кбайт и способен выполнить 256 команд при выполнении программируемых функций, управление выходами на исполнительное устройство, прием информации, поступающей от датчиков, состояние оборудования, формирование выдержек времени, обращение к подпрограммам, организацию условных и безусловных переходов по программе. Конструктивно микроконтроллер выполнен в виде модулей, помещенных в сборный каркас. На лицевой части находится выключатель сети 1, индикаторы наличия стабилизированного напряжения +5В, +12В, –5В 2, индикаторы состояния выходов и входов 3, индикатор режимов ожидания ОЖ 4, пульт управле-



ния 5. Пульт управления имеет однострочный дисплей 7, индикаторы режимов работы 8 и клавиатуру 9. На задней панели микроконтроллера установлены две розетки для ОО, другая – для подключения входов ОФ.

### **Структурная схема микроконтроллера**

Микроконтроллер представляет собой проблемно-ориентированное на задачи циклового и программно-логического управления технологическим оборудованием микропроцессорное устройство, алгоритм работы которого определяется программой, вводимой в его память.

Структурная схема микроконтроллера изображена на рис. 2.2 и состоит из:

- 1) модуля процессора (МПП);
- 2) системы памяти, состоящей из модуля памяти и энергонезависимого запоминающего устройства (ЭНЗУ);
- 3) системы ввода – вывода (МВВ), обеспечивающей с помощью соответствующих модулей связи МПП с пультом управления и внешним технологическим оборудованием;
- 4) системы электропитания.

Модуль процессора (МПП) выполнен на базе БИС КР 580 ИК 80 и предназначен для осуществления сбора, цифровой обработки и вывода информации в соответствии с исполнительной программой, записанной в перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) модуля памяти.

Исполнительная программа, являющаяся неотъемлемой частью микроконтроллера, не доступна для пользователя. Ее назначение – преобразование инструкций, введенных оператором с помощью пульта управления или поступающих от управляющей программы, в последовательность кодов машинного языка микропроцессора, реализующей эти инструкции.

Управляющая программа – программа, занесенная пользователем в кодах команд входного языка микроконтроллера и обеспечивающая выполнение заданного алгоритма управления внешним оборудованием. Она размещается в модулях энергонезависимого запоминающего устройства (МЭНЗУ) и сохраняется при отключении первичного питания микроконтроллера.

Пульт управления (ПУ) совместно с модулем управления (МУ) составляют технические средства общения с микроконтроллером. ПУ включает клавиатуру для ввода команд и управления режимом работы микроконтроллера, однострочный дисплей, предназначенный для отображения контролируемой оператором информации и индикации режимов работы.

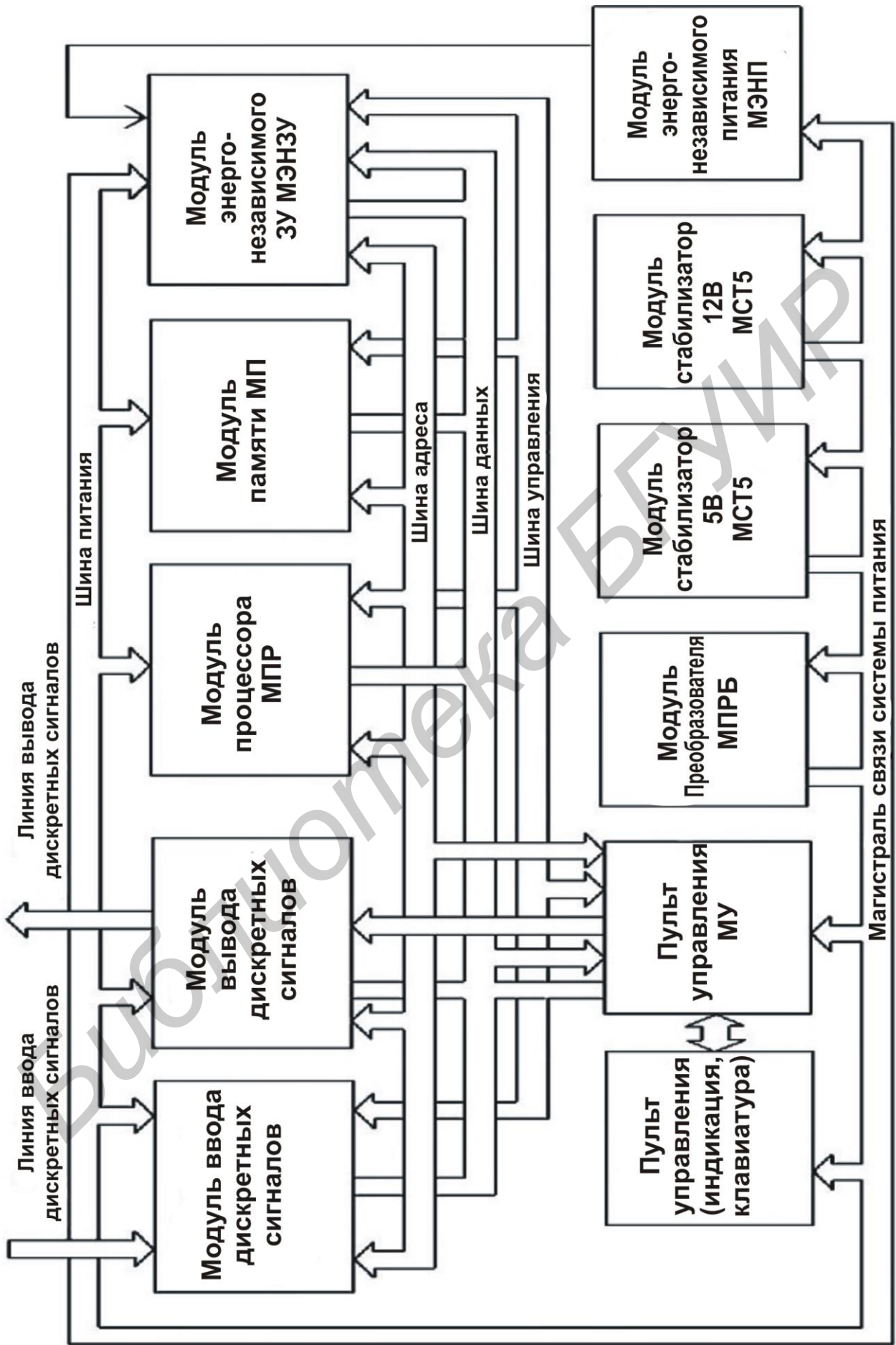


Рис. 2.2. Структурная схема микроконтроллера

Модуль управления (МУ) обеспечивает сопряжение клавиатуры и индикации ПУ с внутренней магистралью обмена информацией микроконтроллера. Модуль ввода (МВВ) и вывода (МВЫВ) дискретных сигналов предназначен для связи микроконтроллера с внешним технологическим оборудованием – электропневмопреобразователями, реле, элементами сигнализации, датчиками состояния оборудования (контактными и бесконтактными), исполнительными устройствами и т. п. Они обеспечивают преобразование уровней и гальваническую развязку сигналов, а также индикацию состояния каждого входа и выхода микроконтроллера.

Система электропитания микроконтроллера преобразует первичное напряжение питающей сети во вторичные стабилизированные напряжения величиной 5 В, +12 В, необходимое для питания его модулей. Модуль энергонезависимого питания (МЭНП) работает от батарей и служит для автономного питания модуля энергонезависимого ЗУ (МЭНЗУ) во время отключения сети.

### **Режимы работы микроконтроллера**

В каждый текущий момент времени микроконтроллер может находиться в одном из пяти режимов работы – автоматическом, ручном, пошаговом, ввода программы и просмотра программы, отображаемых соответственно светодиодными индикаторами А, Р, Ш, ВП, КП. На рис. 2.3 иллюстрируется конфигурация внутренней структуры микроконтроллера в каждом из режимов.

1. Режим «Ввод программы» используется для записи кодов команд управляющей программы в ЭНЗУ. Процессор под управлением исполнительной программы считывает коды нажатых клавиш, формирует из них коды команд и пересылает его в ЭНЗУ по адресу, определяемому счетчиком команд (СК), который размещен в ОЗУ МП. По окончании пересылки каждой команды содержимое счетчика команд увеличивается на единицу. Вводимая информация совместно с текущим значением счетчика команд отображается на дисплее. Ввод в режим осуществляется одновременным нажатием клавиш Р и 3 пульта управления.

2. Режим «Просмотр программы» используется для контроля оператором управляющей программы, хранящейся в памяти микроконтроллера. В соответствии с адресом ячейки ЭНЗУ, записанным в счетчике команд, процессор производит считывание содержащейся в этой ячейке информации и ее вывод на индикацию совместно с текущим значением счетчика команд. Содержимое счетчика команд модифицируется, и процессор переходит в режим ожидания вывода на индикацию содержимого очередной ячейки ЭНЗУ. Выход в этот

режим производится одновременным нажатием клавиш Р и 5 в сторону уменьшения.

3. В режиме «Ручной» сформированный код команды не записывается в ЭНЗУ, как при «Ввод программы», а выполняется. Содержимое счетчика команд при этом не индицируется. Режим вводится нажатием кнопки «Сброс» или одновременным нажатием клавиш Р и 1.

4. Автоматический режим работы является основным и предназначен для управления технологическим оборудованием в соответствии с алгоритмом, реализованном в виде управляющей программы, хранимой в ЭНЗУ. Режим вводится одновременным нажатием клавиш Р и 0. В этом режиме процесс управляется командами ЭНЗУ и связь ПУ с процессором ограничена возможностью изменения только режима работы микроконтроллера, а клавиатура для ввода кодов команд заблокирована.

5. Режим «Пошаговый» предназначен для отладки управляющих программ работы микроконтроллера и позволяет осуществлять выборку из ОЗУ и выполнение очередной команды. Каждое нажатие любой клавиши, если оно не связано с изменением режима работы, инициирует процессор на выполнение очередного шага команды и вывод на индикацию адреса и содержимого ячейки ЭНЗУ, хранящей команду следующего шага. Режим вводится одновременным нажатием кнопок пульта управления Р и 2.

### **Система команд микроконтроллера**

Микроконтроллер оснащен системой команд, предназначенной для решения задач циклового или программно-логического управления дискретными производственными процессами и обеспечивающей простоту и высокую производительность программирования. Исходная информация для составления программ может быть представлена циклограммой работы оборудования, блок-схемой алгоритма управления или в виде булевых функций.

Система команд микроконтроллера реализована исполнительной программой, хранящейся в ППЗУ модуля памяти.

Команды микроконтроллера можно разделить по функциональному назначению на следующие группы:

1. Команды ввода – вывода.
2. Команды управления программой.
3. Команды управления счетчиками.
4. Команды контроля и редактирования программы.
5. Команды текстового контроля функциональных блоков.

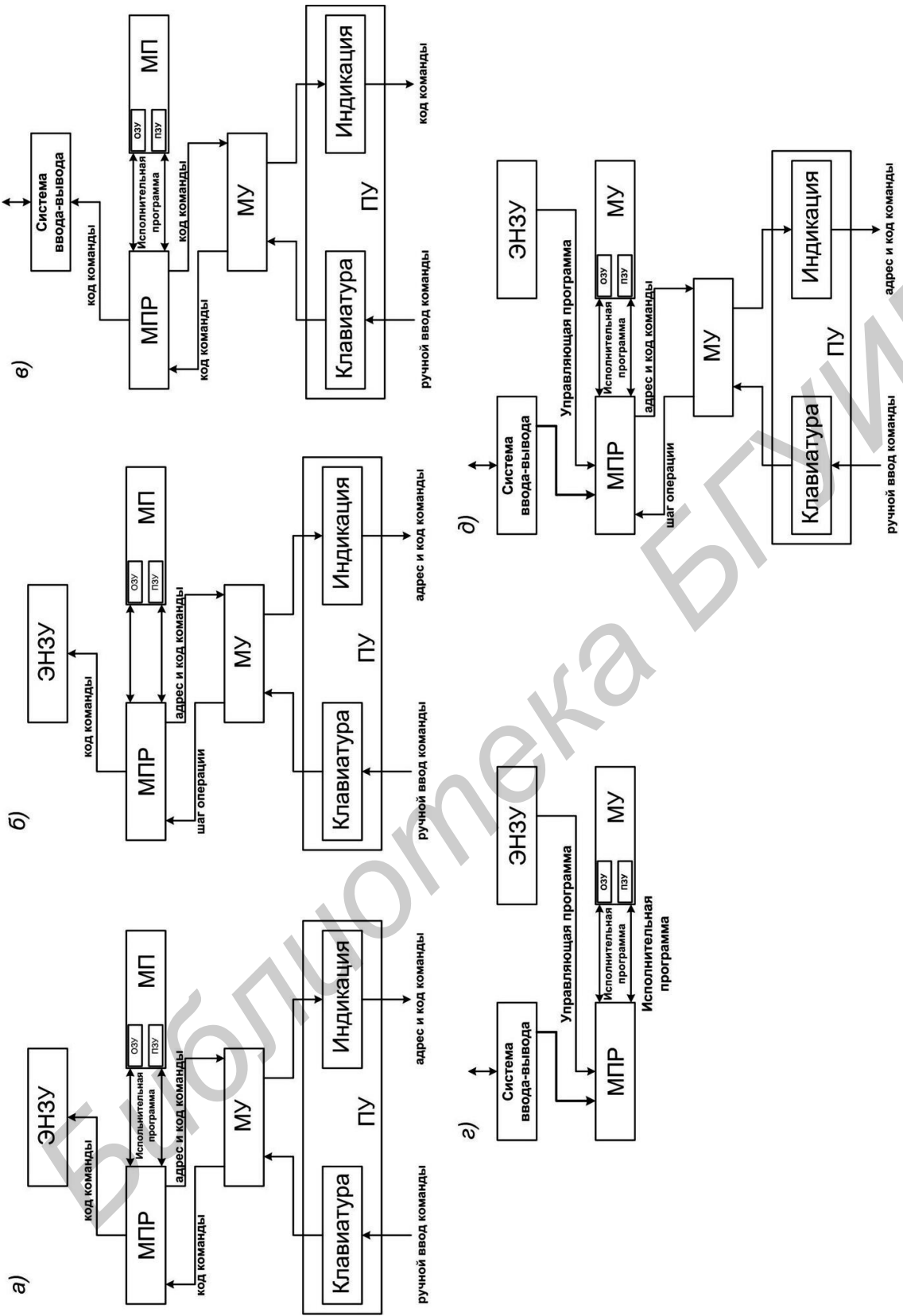


Рис. 2.3. Конфигурация внутренней структуры микроконтроллера в различных режимах работы:  
а – «Ввод программы»; б – «Просмотр программы»; в – « Ручной»;  
г – «Автоматический»; д – «Пошаговый»

Таблица 2.1

Сокращенное обозначение команды	Формат команды		Краткое содержание
	Код операции	Операция	
Команды ввода – вывода			
ОЖО	01	Адрес входа	Ожидание отсутствия входного сигнала. Переход к выполнению следующей программы происходит только при отсутствии сигнала на входе с заданным адресом
ОЖ1	02	Адрес входа	Ожидание наличия входного сигнала. Переход к выполнению следующей команды программы происходит только при наличии сигнала на входе с заданным адресом
ОЖ2	03	Адрес входа	Проверка входа на отсутствие сигнала. При отсутствии сигнала на входе с заданным адресом бит условия сохраняет предыдущее значение, в противном случае бит условия обнуляется
ПР1	04	Адрес входа	Проверка входа на наличие сигнала. При наличии сигнала на входе с заданным адресом бит условия сохраняет предыдущее значение, в противном случае бит условия обнуляется
ВКЛ	05	Адрес выхода	Включить выход с заданным адресом
ВЫКЛ	06	Адрес выхода	Выключить выход с заданным адресом
БУ	12	Адрес выхода	Вывод бита условия прямой. Выход заданным адресом устанавливается в соответствии с содержанием бита условия
БУ	13	Адрес выхода	Вывод бита условия инверсный. Выход с заданным адресом устанавливается в соответствии со значением, противоположным содержимому бита условия
Т	07	Т	Время выдержки. Команда задержки выполнения управляющей программы на время $T = 0,1$ с
УСТ БУ ВК	1E	Адрес входа	Бит условия принимает значение сигнала на входе с заданным адресом
УСТ БУ ВК	1	Адрес входа	Бит условия принимает инверсное значение сигнала на входе с заданным адресом

Команды управления программой			
НОП	00	00	Нет операции Безусловный переход к выполнению следующей команды программы
СТОП	08	00	Остановка программы
БУП	09	Адрес команды	Безусловный переход к выполнению команды, содержащейся по указанному адресу
УП1	0A	Адрес команды	Переход к выполнению программы, содержащейся по указанному адресу, если в бите условия «1». В противном случае происходит выполнение следующей команды программы
УП0	0B	Адрес команды	Переход к выполнению команды, содержащейся по указанному адресу, если в бите условия «0». В противном случае происходит выполнение следующей команды программы
БАП	0	0 установка	Изменение базового адреса программы
ПП	10	Адрес команды	Переход К ПОДПРОГРАММЕ. Переход к выполнению команды, содержащейся по указанному адресу с запоминанием адреса возврата
Возврат	11	00	Возврат из подпрограммы
Команды управления счетчиками			
ССЧ	00	0 номер счетчика	Сброс счетчика. Обнуление счетчика с заданным номером
+ СЧ	0C	0 номер счетчика	Содержание счетчика с заданным номером увеличивается на 1
= СЧ	0E	Установка номера счетчика	Сравнение счетчика. Если содержимое счетчика с заданным номером равно установке, то бит условия сохраняет свое предыдущее значение. В противном случае бит условия обнуляется
Команды контроля и редактирования программ			
РЕД	14	Адрес команды	Команда управляющей программы, начиная с указанного адреса и до первого адреса, содержащего команду НОП, сдвигающегося в сторону увеличения адресов на один шаг. По указанному адресу записывается код 0000 команды НОП. Команды РЕД используется для вставки команд в управляющую программу
КСП	15	Номер страницы	Вычисление контрольной суммы кодов команд, содержащихся в странице памяти с указанным номером

Команды текстового контроля функциональных блоков			
Текст МПИ	2С	00	Команды проверки МПИ
Текст МЭНЗУ	18	Количество проверяемых модулей	
Команды проверки МЭНЗУ			
Текст ввода – вывода	19	Количество проверяемых модулей	Команды проверки системы дискретного ввода – вывода
Текст ввода – вывода	19	Количество проверяемых модулей	Команды проверки системы дискретного ввода – вывода

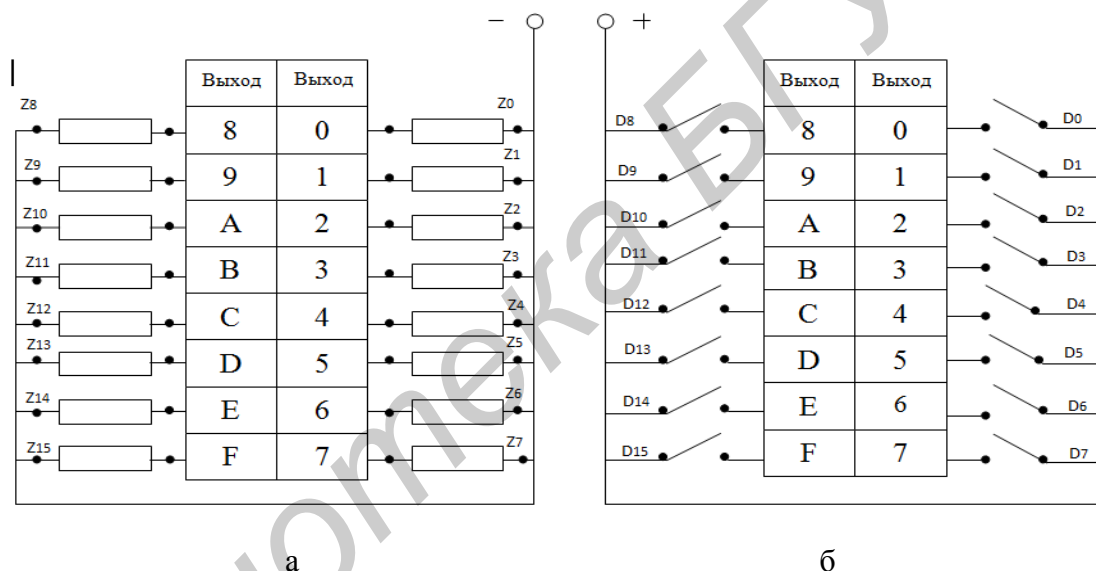


Рис. 2.4. Схема выходов и входов микроконтроллера:  
а – нагрузки; б – разрыв

В качестве примера рассмотрим работу систему токовой подгонки тонкопленочных резисторов, управляемой микроконтроллером (рис. 2.5). Технологический процесс будет иметь такую последовательность операций: контактирование зондов к выводам сопротивления, сравнение с заданными значениями в памяти, отключение системы измерения, подключение системы подгонки на время  $T$ , сравнение значения и определение, в случае удовлетворения разброса, запоминание координат данного резистора и переход к следующему.

Предполагается, что система контактирования, включающая в себя заданные положения зондов в системе координат выполнена отдельно от микроконтроллера. Кроме этого, система сравнения номиналов резисторов, включа-



ющая в себя АЦП и блок логики, ТО выполнена отдельно и служит только для выдачи сигналов высокого «1» и низкого «0» для микроконтроллера.

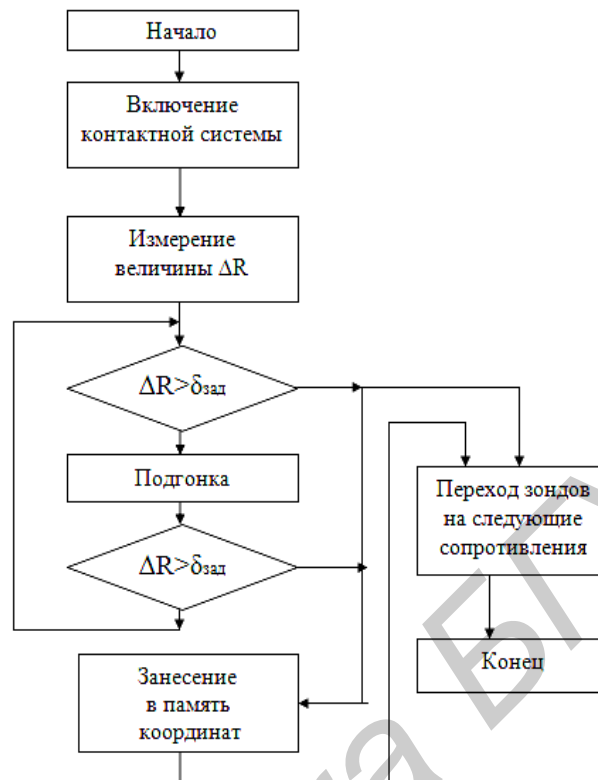


Рис. 2.5. Схема алгоритма токовой подгонки пленочных резисторов

Таблица 2.2

Таблица записи работы микроконтроллера по подгонке пленочных резисторов

Адрес команды	Формат команды		Содержание
	Код операции	Операция	
000	05	00	Включить выход по адресу 00 Включается система контактирования
001	05	01	Включить выход по адресу 01 Включается система измерения и выдается «0» или «1»
002	0P	0A	Бит условия, если БУ = 0, то переход на адрес 0A (переход зондов на след. сопр.)
003	06	01	Отключить систему измерения
004	05	02	Включить выход по адресу 02 ток подгонки на токовые зонды
005	07	05	Выдержать ток подгонки 0,5 с
006	06	02	Отключить ток подгонки
007	05	01	Включить систему измерения

008	0	0A	Если БУ= 0, то переход по адресу 0A Если БУ= 1, то переход к следующему адресу
009	09	03	Безусловный переход по адресу 003
0A0	06	00	Отключить систему контактирования, переход на следующее сопротивление
0A1	09	00	Переход к команде по адресу 000 – начало нового цикла измерения
0A2	08	00	Остановка

### Индивидуальное задание

1. Составить структурную схему системы управления на базе микроконтроллера для:

- а) робота-манипулятора;
- б) РТК;
- в) ячейки ГАП;
- г) участка;
- д) транспортной тележки.

В каждом конкретном случае самостоятельно выбирается оборудование для конкретного техпроцесса.

2. Составить программу управления транспортной тележкой, роботом манипулятором при условии, что они будут обслуживать 1, 2, 3, 4, 5 единиц оборудования.

3. Привести пример использования робота-манипулятора:

- а) в сборочном процессе;
- б) в получении гальванических и лакокрасочных покрытий;
- в) при обработке материала резанием;
- г) для вспомогательных работ;
- д) для термической обработки.

4. Составить программу на любой процесс п. 3 и, проанализировав ее, привести еще 2–3 варианта.

5. Разобрать и описать работу микроконтроллера в режимах:

- а) ввода программ;
- б) просмотра программ;
- в) «Ручной»;
- г) «Автомат»;
- д) «Пошаговый»;
- е) привести схему внутренней структуры.

## **Порядок выполнения работы**

1. Включить микроконтроллер.
2. Проверить работу режимов «ручной», «автоматический», «шаговый», «ввод программы».
3. Составить программу на включение и выключение входов с задержкой по времени (8–10 входов задержки) от 1 до 10 секунд. Перевести программу в автоматический режим.
4. Составить алгоритм и написать программу с условными и безусловными переходами (не менее 20–30). Пользуясь переключками произвести соединение входов и выходов, ввести программу и, проверив в пошаговом режиме, перевести в автоматический (проверить включение программы).
5. Произвести коррекцию заданных преподавателем переходов в программе.

### **Содержание отчета**

1. Описание структуры микроконтроллера.
2. Упрощенная структурная схема микроконтроллера.
3. Алгоритм и программа (не менее 20–30 переходов).
4. Произвести анализ программы с целью повышения ее компактности.
5. Выводы.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Достоинства циклической системы управления.
2. Состав системы управления адаптивных роботов.
3. Виды и назначение шин коммутации в микроконтроллере МКП.
4. Команды образования безусловного перехода.
5. Устройство модуля МЭНЗУ.

### **Литература**

1. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
2. Воротников, С. А. Информационные устройства робототехнических систем / С. А. Воротников. – М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2005. – 214 с.

3. Смирнов, А. Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами / А. Б. Смирнов. – СПб., 2003. – 342 с.

4. Корендясев, А. И. Теоретические основы робототехники. Кн. 1, 2 / А. И. Корендясев. – М. : Наука, 2006. – 321 с.

Библиотека БГУИР

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### Исследование индукционных систем синхронной связи

#### Цель работы

Изучить устройство, принцип работы и исследовать основные характеристики сельсинов.

#### Теоретические сведения

В различных отраслях промышленности и системах автоматического управления и регулирования, а также в следящих системах широкое применение получили индукционные системы связи, под которыми понимают совокупность устройств, служащих для измерения или передачи на расстояние угловых перемещений двух или нескольких валов, механически не связанных между собой. К достоинствам таких систем можно отнести:

- отсутствие искровой коммутации при работе системы;
- высокую точность (ошибка не более  $2,5^\circ$  для машин низкого класса);
- использование датчиков и приемников бесконтактного типа;
- однотипность датчиков и приемников.

Применяемые в индукционных системах в качестве датчиков и приемников микромашины получили название сельсинов.

Используемые в синхронных системах дистанционной передачи угла сельсины и сами системы можно подразделить на две группы: трехфазные силовые и однофазные.

Трехфазные сельсины применяют в схемах электрического вала, где необходимо строго синхронное и синфазное перемещение двух двигателей, удаленных друг от друга. В таких схемах сельсины работают и как датчик, и как приемник.

Однофазные сельсины могут работать в двух основных режимах:

1) индикаторном, когда датчик поворачивается принудительно, а приемник устанавливается в согласованное с датчиком положение под воздействием собственного синхронизирующего момента;

2) трансформаторном, когда датчик поворачивается принудительно, а приемник вырабатывает напряжение, являющееся функцией угла рассогласования.

Для обоих режимов возможны следующие схемы: парная (датчик – приемник); многократная (датчик – несколько приемников); дифференциальная (два датчика – приемник).

Однофазный сельсин может работать как в индикаторном, так и в трансформаторном режимах в качестве датчика и приемника. Однако ввиду специфики предъявляемых требований выпускаемые сельсины предназначаются для конкретного режима работы.

Однофазные сельсины получили наибольшее распространение в системах автоматики, и поэтому в данной лабораторной работе рассмотрим именно их.

### Конструкция и принципы действия однофазных сельсинов

Однофазные сельсины по конструкции и наличию скользящих контактов можно разделить на контактные и бесконтактные (рис. 3.1).

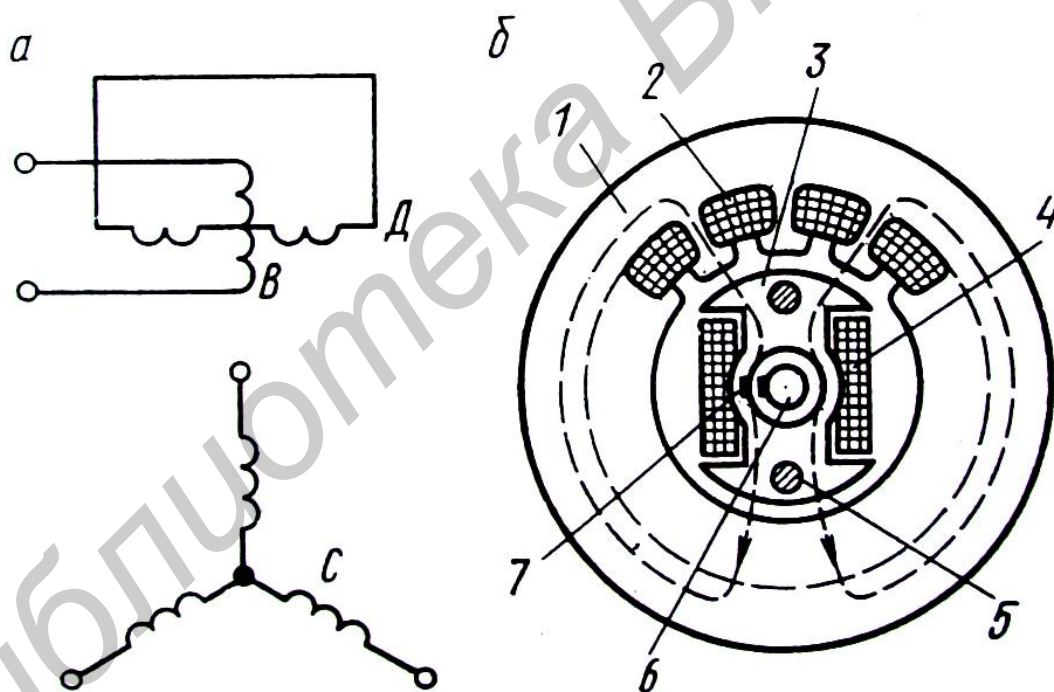


Рис. 3.1. Контактные сельсины

Контактные состоят их двух частей: статора и ротора. На статоре (или роторе) располагают однофазную обмотку возбуждения  $B$ ; на роторе (или статоре) – обмотку синхронизации  $C$ .

У однофазных сельсинов обмотку выполняют по типу трехфазной, т. е. три отдельные обмотки смещены в пространстве на угол  $120^\circ$  и соединены в

звезду. Обмотка синхронизации всегда распределенная; обмотка возбуждения может быть и распределенной, и сосредоточенной. Так как в случае распределенной обмотки удельный синхронизирующий момент меньше, то в сельсинах, предназначенных для индикаторного режима, предпочтительнее применять сосредоточенную обмотку возбуждения.

Обмотка возбуждения сельсина создает пульсирующий магнитный поток. Этот поток, проходя по магнитопроводу сельсина, пересекает витки обмотки, синхронизации, и наводит в них трансформаторные ЭДС, зависящие от угла поворота ротора. Так как при повороте ротора взаимдуктивность между обмотками возбуждения и синхронизации плавно изменяется по закону косинуса, то в обмотке синхронизации наводятся фазные ЭДС, пропорциональные косинусу угла поворота ротора.

У некоторых сельсинов имеется короткозамкнутая демпферная обмотка  $D$ , расположенная перпендикулярно обмотке  $B$  (рис. 3.1, а).

Принцип работы сельсина не зависит от места расположения каждой из обмоток на статоре или на роторе, однако наиболее распространены (рис. 3.1, б) сельсины с обмоткой возбуждения, расположенной на роторе 3, и обмоткой синхронизации 2 на статоре 1. У них меньше контактных колец 6 и щеток 7, что обеспечивает более высокую надежность, меньший момент трения и объем сельсина.

Наличие щеточного контакта значительно снижает надежность контактных сельсинов, вносит погрешность в работу синхронной связи. Бесконтактные сельсины лишены указанных недостатков (рис. 3.2).

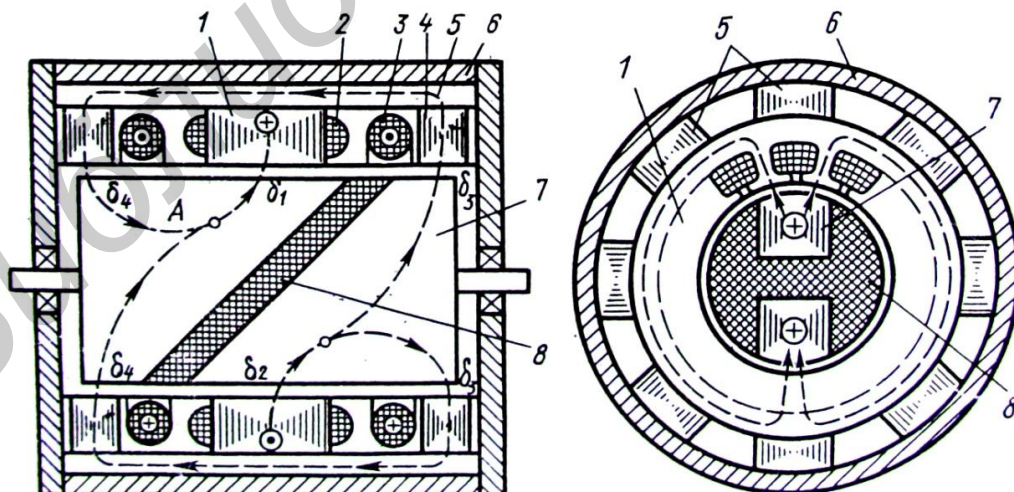


Рис. 3.2. Бесконтактные сельсины

В таком сельсине контактный подвод тока к ротору заменен бесконтактным подводом магнитного потока. На статоре расположены: основной ферромагнитный сердечник 1, в пазах которого находится трехфазная обмотка синхронизации и обмотка возбуждения 3, выполненная в виде двух кольцевых катушек. По краям статора размещены два кольцевых магнитопровода 4. Они магнитно замыкаются между собой пакетами внешнего магнитопровода 5, запрессованными в цилиндрический корпус сельсина 6. Основной сердечник и кольцевые магнитопроводы набраны из изолированных листов электротехнической стали, шихтованных по оси, перпендикулярной к валу сельсина.

Чтобы каждый лист не был короткозамкнутым витком на пути основного потока возбуждения, вводимого в аксиальном направлении (вдоль вала), в одном месте он имеет радиальный разрез. Пакеты внешнего магнитопровода шихтованы вдоль вала сельсина. Ротор сельсина 7 состоит из двух ферромагнитных пакетов, разделенных немагнитным промежутком 8. Каждый пакет собран из изолированных листов электротехнической стали, причем плоскости листов ротора параллельны валу сельсина. Немагнитный промежуток обычно силумин или пластмасса, в которую запрессованы листы обоих пакетов ротора.

Принципы действия бесконтактного сельсина можно понять, проследив путь магнитного потока  $\Phi$ . Пусть в данный момент времени ток в обмотке возбуждения 3 протекает так, как показано на рис. 3.2. Тогда магнитный поток  $\Phi$  будет направлен слева направо. Выйдя из точки А, он встречает на пути немагнитный промежуток 8, меняет направление и через воздушный зазор б входит в сердечник 1, проходит по нему половину окружности, и через воздушный зазор б2 попадает в правый пакет ротора. Отсюда через зазор б3 поток входит в правый кольцевой магнитопровод 4. Далее поток по пакетам внешнего магнитопровода 5 проходит в левый кольцевой магнитопровод 4 и, пройдя через воздушный зазор б4, вновь поступает в левый пакет ротора, где и замыкается в точке А. Проходя по основному сердечнику 1, поток возбуждения сцепляется с обмоткой синхронизации и наводит в ней ЭДС. При повороте ротора с ним поворачивается и магнитный поток, т. е. потокосцепление обмотки синхронизации с потоком возбуждения изменяются по тому же закону, что и у контактного сельсина.

К недостаткам бесконтактных сельсинов относят: большие потери МДС обмотки возбуждения в воздушных зазорах, большие габаритные размеры и масса по сравнению с контактными, выполненными на тот же полезный момент.



## Индикаторный режим работы сельсинов

Для передачи на расстояние информации о положении какого-либо регулирующего органа (клапана, заслонки, вентиля и т. д.) наиболее удобны сельсины, работающие в индикаторном режиме, особенно когда подход к регулирующему органу небезопасен и показания передаются на пульт управления. При этом сельсин-приемник, как правило, не должен иметь момента сопротивления на валу; с его ротором связана только стрелка, указывающая значение передаваемого угла.

Принципы действия. В индикаторном режиме обмотки возбуждения сельсина-датчика СД и сельсина-приемника СП подключаются к однофазной сети переменного тока. Обмотки синхронизации соединены между собой линией связи строго соответственно (рис. 3.3).

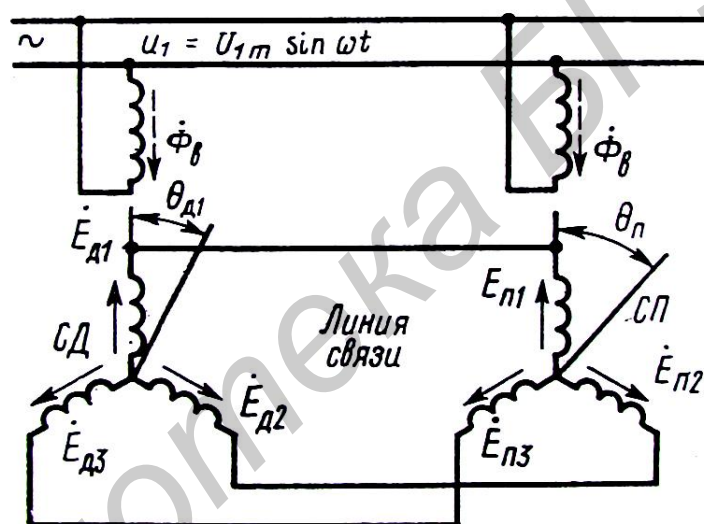


Рис. 3.3. Схема подключения сельсина к однофазной сети переменного тока

Обмотки возбуждения СД и СП создают в магнитных системах магнитные потоки  $\Phi_\delta$ . Оба потока в силу идентичности сельсинов одинаковы. Если распределение индукции вдоль зазора синусоидально, то под действием пульсирующих магнитных потоков в обмотке синхронизации сельсина возникают фазные ЭДС.

$$\begin{aligned}
 E_{д1} &= E_{\max} \cdot \cos \theta_\delta; \\
 E_{д2} &= E_{\max} \cdot \cos(\theta_\delta - 120^\circ); \\
 E_{д3} &= E_{\max} \cdot \cos(\theta_\delta - 240^\circ).
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

где  $E_{\max}$  – наибольшее действующее значение фазной ЭДС обмотки синхронизации, соответствующее совпадению оси обмотки фазы и потока возбуждения;

$Q_d$  – угол поворота ротора сельсина-датчика от исходного положения (за исходное положение примем такое, когда обмотка, образующая фазу обмотки синхронизации, в которой наводится ЭДС  $E_d$ , соосна с потоком возбуждения).

Аналогично ЭДС для сельсина-приемника

$$\begin{aligned} E_{d1} &= E_{\max} \cdot \cos \theta_{\Pi}; \\ E_{d2} &= E_{\max} \cdot \cos(\theta_{\Pi} - 120^\circ); \\ E_{d3} &= E_{\max} \cdot \cos(\theta_{\Pi} - 240^\circ). \end{aligned} \quad (3.2)$$

Угол рассогласования равен разности между углами поворота ротора датчика и приемника:

$$\theta = \theta_d - \theta_{\Pi}. \quad (3.3)$$

Если

$$\theta = 0 \text{ т. е. } \theta_d = \theta_{\Pi}, \text{ то } E_d = E_{\Pi}, E_{d1} = E_{\Pi2}; E_{d3} = E_{\Pi3}.$$

Фазные ЭДС обмоток синхронизации датчика и приемника в контуре направлены встречно, и токи в обмотках синхронизации и линии связи равны нулю. В этом случае отсутствует момент взаимодействия обмоток синхронизации с потоком возбуждения и сельсины находятся в покое. Это положение является согласованным для сельсинов в индикаторном режиме.

При  $\theta \neq 0$  в контурах обмотки синхронизации датчика и приемника возникают результирующие ЭДС, равные разности ЭДС датчика и приемника. Эти разностные ЭДС создают токи, проходящие по обмоткам синхронизации. Токи взаимодействуют с пульсирующими потоками обмотки возбуждения и создают вращающие моменты, направленные в датчике и приемнике встречно друг другу и стремящиеся свести к нулю угол рассогласования  $\theta$ . Эти моменты называются синхронизирующими. Так как в индикаторном режиме ротору датчика угол задан принудительно и зафиксирован, то ротор приемника под действием синхронизирующего момента поворачивается на угол  $\theta_d = \theta_{\Pi}$ .

### Трансформаторный режим работы сельсинов

Для передачи углового перемещения или вращения на расстояние с преодолением значительного момента сопротивления используют следящие систе-

мы, частью которых являются сельсины, работающие в трансформаторном режиме. При этом по линии связи передается незначительный по мощности сигнал, затем он усиливается, приводит во вращение исполнительный двигатель, который перемещает объект управления, одновременно уменьшает угол рассогласования между сельсином-датчиком и сельсином-приемником.

На рис. 3.4, а приведена схема соединения сельсинов в трансформаторном режиме.

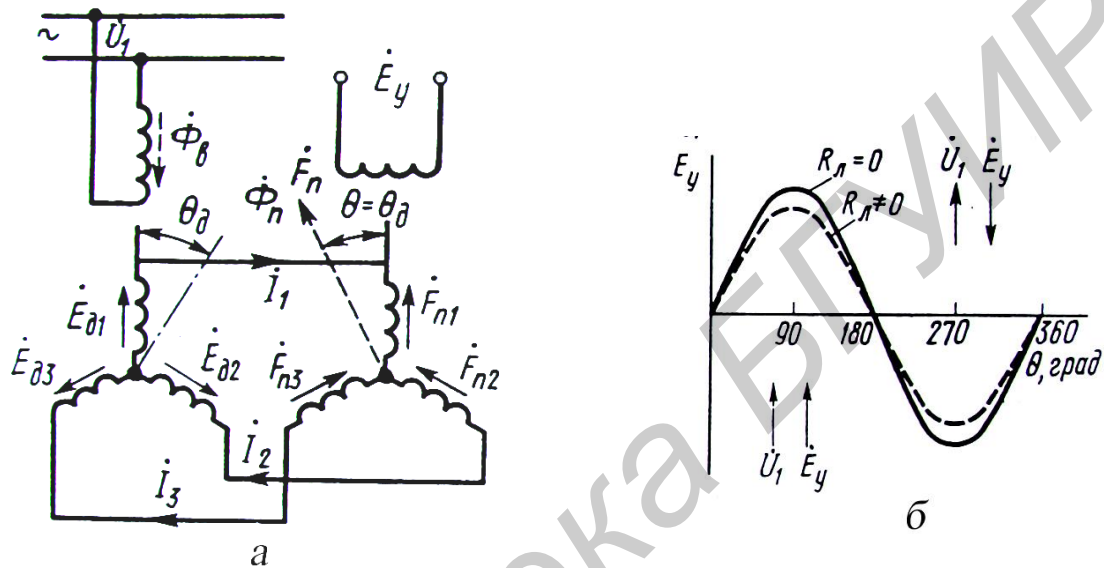


Рис. 3.4. Схема соединения сельсинов в трансформаторном режиме (а) и зависимость выходной ЭДС  $E_y$  сельсина-приемника от угла  $\theta_d$  при различных сопротивлениях линии связи (б)

Обмотка возбуждения сельсина-датчика подключена к питающей сети и служит для создания в магнитной системе пульсирующего магнитного потока. Обмотки синхронизации СД и СП соединены между собой строго соответственно линией связи. Однофазная обмотка СП, предназначенная для выработки сигнала (напряжения), зависящего от угла рассогласования, называется обмоткой управления.

В трансформаторном режиме согласованным называют такое состояние схемы, когда ЭДС обмотки управления сельсина-приемника равны нулю. При этом (рис. 3.4, а) обмотка управления приемника оказывается повернутой на  $90^\circ$  относительно его обмотки синхронизации по сравнению с положением обмотки возбуждения относительно его обмотки синхронизации. Угол  $\theta_d$  отсчитывается от этого положения. Пульсирующий магнитный поток обмотки возбуждения датчика  $\Phi_\delta$  индуцирует в обмотке синхронизации фазные ЭДС

$E_{d1}, E_{d2}, E_{d3}$ , которые можно определить по (3.1). Токи, проходящие под воздействием этих ЭДС по обмоткам синхронизации приемника, создают МДС  $F_{n1}, F_{n2}, F_{n3}$ . При повороте ротора датчика на угол  $\theta$  вектор результирующей МДС обмотки синхронизации приемника  $F_n$  поворачивается относительно этой обмотки на угол, равный  $\theta_d$ , но с противоположным знаком.

Результирующая МДС создает магнитный поток  $\Phi_n$ , взаимодействующий с обмоткой управления сельсина приемника и наводящий в ней выходную ЭДС

$$E_y = E_{y\max} \cdot \sin \theta, \quad (3.4)$$

где  $E_{y\max}$  соответствует совпадению направления вектора результирующей МДС с осью обмотки управления сельсина-приемника.

Фаза выходной ЭДС меняется дискретно на  $180^\circ$  через  $180^\circ$  угла поворота ротора. На рис. 3.4, б показана зависимость выходной ЭДС  $E_y$  сельсина-приемника от угла  $\theta$  при различных сопротивлениях линии связи  $R_x$  фазовые соотношения характеризуются положением векторов  $E_y$  и  $U_i$ .

### Основные параметры сельсинов

Статистическая погрешность сельсинов – разность между значением угла, заданного датчиком и значением угла, отработанного приемником, т. е.  $\Delta\theta = \theta_d - \theta_n$ . Наличие угла рассогласования  $\Delta\theta$  при работе сельсинной пары без нагрузки на валу объясняется следующими причинами: трением в подшипниках, трением щеток о кольца, в случае контактных систем, неодинаковостью фаз обмоток синхронизации, недоброкачественной сборкой пакетов, неравномерностью воздушного зазора, недостаточной балансировкой.

Удельный синхронизирующий момент – вращающий момент на валу сельсина-приемника, приходящийся на один градус угла рассогласования. Точность работы сельсинов тем выше, чем больше удельный синхронизирующий момент.

Остаточное напряжение – минимальное напряжение на зажимах выходной обмотки сельсин-приемника при согласованном положении сельсинов. Для повышения точности работы трансформаторной схемы величину остаточного напряжения стремятся снизить до 0,2–0,5 В.

Удельное выходное напряжение – напряжение, приходящееся на один градус рассогласования. Чем выше его значение, тем точнее работа системы.

## Порядок выполнения работы

1. Изучить структурную и функциональную схемы лабораторной установки, приведенные на рис. 3.5 и 3.6 соответственно.

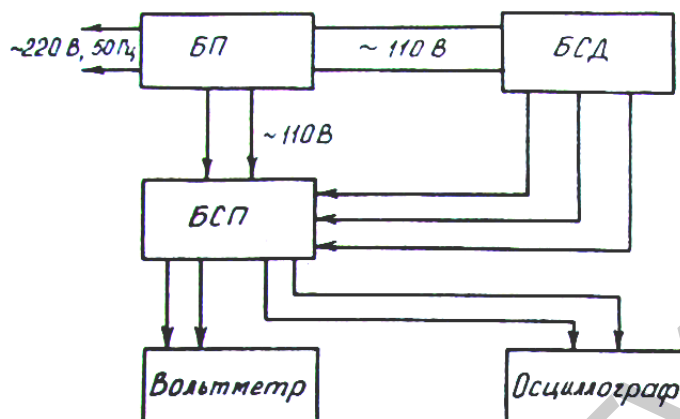


Рис. 3.5. Схема структурная лабораторной установки:  
БП – блок питания; БСД – блок сельсин-датчиков; БСП – блок сельсин-приемников

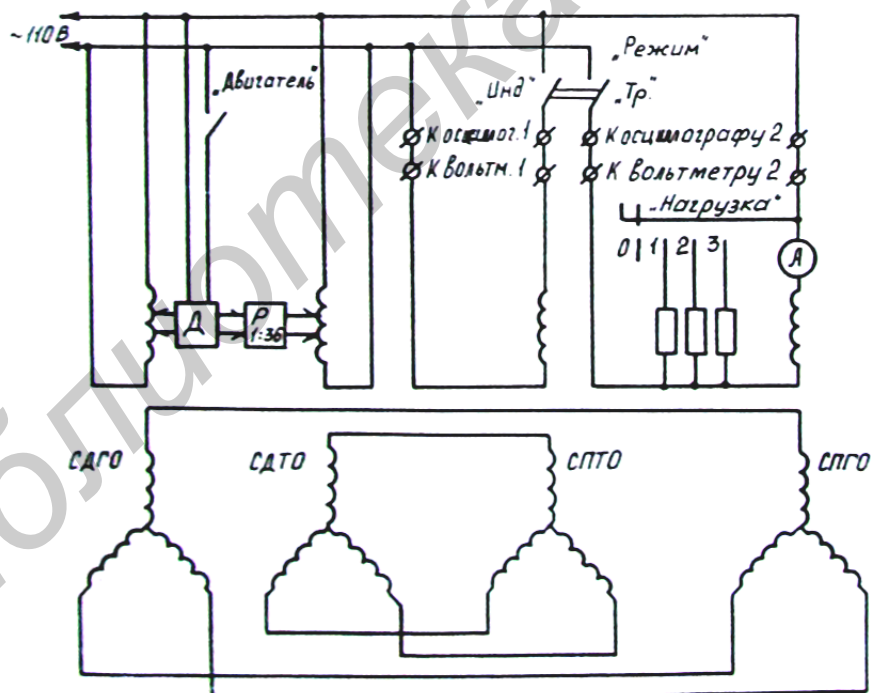


Рис. 3.6. Схема функциональная лабораторной установки:  
Д – двигатель; Р – редуктор; СДГО – сельсин-датчик грубого отсчета;  
СДТО – сельсин-датчик точного отсчета; СПГО – сельсин-приемник грубого отсчета;  
СПТО – сельсин-приемник точного отсчета

## 2. Исследовать работу сельсинов в индикаторном режиме.

Для этого:

а) растормозить роторы сельсин-приемников с помощью тормозных устройств, находящихся на горизонтальной панели блока сельсин-приемников (БСП); перевести тумблер «Режим» на блоке сельсин-датчиков (БСД) в положение «Инд.»; на блоке питания (БП) тумблеры «Сеть» и «Двигатель» установить в положение «Выкл.»; переключатель «Нагрузка» на БСП установить в положение «1»; шнур питания установки подключить к сети 220 В 50 Гц; установить делители осциллографа и вольтметра на максимальный предел измерения и подключить их входы к гнездам «Осциллограф 2» и «Вольтметр 2»; включить тумблеры «Сеть» на БП, осциллографе и вольтметре; на БП включить тумблер «Двигатель» и проверить работу системы в индикаторном режиме (при исправном состоянии системы шкалы, находящиеся на сельсин-датчиках и приемниках должны синхронно вращаться); выключить тумблер «Двигатель»;

б) произвести согласование сельсин-приемника с сельсин-датчиком. Для чего: установить шкалы на БСД в нулевое положение; соблюдая осторожность, отпустить два винта, фиксирующих положение корпусов сельсин-приемников грубого отсчета (ГО) и точного отсчета (ТО), и, поворачивая корпус соответствующего сельсина в ту или иную сторону относительно продольной оси, добиться нулевого положения их шкал; зафиксировать эти положения винтами;

в) определить удельный синхронизирующий момент  $M_{уд}$ . К диску на роторе сельсин-приемника подключить динамометр; шкалу датчика ТО повернуть по часовой стрелке на  $10^\circ$ ; вращать винт, перемещающий динамометр, до тех пор, пока шкала сельсин-приемника ГО не возвратится в нулевое положение; считать показание динамометра, вольтметра и амперметра и занести данные измерения в табл. 3.1; повторить опыт, рассогласовывая сельсины до  $180^\circ$  через каждые  $20^\circ$ ; установить шкалы сельсин-датчиков в нулевое положение, после чего отсоединить динамометр.

Таблица 3.1

Таблица рассогласования сельсинов до  $180^\circ$

$\Delta Q$ , град	10	20	40	60	80	100	120	140	160
$F$ , Н									
$I$ , А									
$U$ , В									
$P$ , Вт									
$M$									

По формуле

$$M_{\text{yd}} = F \cdot L / 10, \quad (3.5)$$

где  $M_{\text{yd}}$  – синхронизирующий момент;

$F$  – показание динамометра в  $H, L$  – расстояние от центра вала до точки крепления динамометра в  $M$  (0,015 м), рассчитать удельный синхронизирующий момент сельсина; построить зависимости синхронизирующего момента, тока, мощности возбуждения от угла рассогласования:

$$M, I, P = f(\Delta Q).$$

3. Исследовать работу сельсинов в трансформаторном режиме.

Для этого:

а) включить устройство в трансформаторный режим путем переключения тумблера «Режим» на БСД в положение «Тр.»;

б) определить величину остаточного напряжения. С помощью тормозного устройства, находящегося на горизонтальной панели БСП, закрепить ротор приемника Г0 в нулевом положении; ротор датчика Г0 поворачивать до тех пор, пока осциллограф не покажет минимальное напряжение, называемое остаточным; измерить  $U_{\text{вых}}$  вольтметром, переключая его предел измерения на соответствующий диапазон;

в) построить зависимости выходного напряжения, мощности и тока возбуждения от угла рассогласования при различных нагрузках:

$$U_{\text{вых}}, M, I, P = f(\Delta Q).$$

Переключатель «Нагрузка» на БСП перевести в положение ( $R_H = 560 \text{ кОм}$ ); поворачивать ротор датчика от  $0^\circ$  да  $180^\circ$  через каждые  $20^\circ$  по часовой стрелке и занести показания вольтметра и амперметра в табл. 3.2; переключатель «Нагрузка» поставить в положение «2» ( $R_H = 3 \text{ кОм}$ ); а затем в положение «3» ( $R_H = 1 \text{ кОм}$ ); снова повторить опыт; построить графики;

г) определить удельное выходное напряжение при различных нагрузках по формуле

$$U_{\text{e.yd}} = U_{\text{вых.20}} / 20, \quad (3.6)$$

где  $U_{\text{в.уд}}$  – выходное напряжение при угле рассогласования  $20^\circ$ ;

д) построить зависимости выходных напряжений сельсин-приемника ТО и сельсин-приемника ГО от угла рассогласования. Переключатель «Нагрузка» поставить в положение «1»; поворотом шкалы сельсин-датчика ТО задать угол рассогласования от  $0$  до  $10^\circ$  через  $1^\circ$  и измерить вольтметром выходные напряжения на сельсин-приемнике ТО и сельсин-приемнике ГО. При этом вход вольтметра подключать соответственно к гнездам «Вольтметр 1» и «Вольтметр 2»; результаты измерений занести в табл. 3.3; построить графики; сделать выводы о повышении точности передачи угла на расстояние путем изменения коэффициента передачи редуктора в БСД;

Таблица 3.2

Таблица зависимости выходного напряжения, мощности и тока возбуждения от угла рассогласования при различных нагрузках

$\Delta Q$ , град	10	20	40	60	80	100	120	140	160
$RH$ , кОм									
$I$ , А									
$U_{\text{вых}}$ , В									
$P$ , Вт									
$RH$ , кОм									
$I$ , А									
$U_{\text{вых}}$ , В									
$P$ , Вт									
$RH$ , кОм									
$I$ , А									
$U_{\text{вых}}$ , В									
$P$ , Вт									

Таблица 3.3

Таблица зависимости выходных напряжений сельсин-приемника ТО и сельсин-приемника ГО от угла рассогласования

$\Delta Q$ , град	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{вых.ТО}}$ , В										
$I_2$ , В										



- е) обесточить все приборы и лабораторную установку.
4. Сделать выводы по работе.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Структурная и функциональная схемы.
3. Основные рабочие формулы.
4. Таблицы экспериментальных данных.
5. Графики.
6. Выводы.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Дать определение понятию «сельсин».
2. Определить область применения сельсинов.
3. Дать классификацию сельсинов.
4. Описать принцип работы сельсинов в индикаторном режиме.
5. Описать принцип работы сельсинов в трансформаторном режиме.
6. Перечислить основные характеристики сельсинов.

### **Литература**

1. Электромашинные устройства автоматики / Е. В. Арменский [и др.]. – М. : Высш. шк., 1986. – 247 с.
2. Волков, Н. И. Электромашинные устройства автоматики / Н. И. Волков, В. П. Миловозов. – М. : Высш. шк., 1986. – 335 с.
3. Водовозов, А. М. Элементы систем автоматики : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 1-40 06 04 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» направления подготовки 1-40 06 00 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / А. М. Водовозов. – М. : Академия, 2006. – 219 с.
4. Сапожников, Вл. В. Станционные системы автоматики и телемеханики : учебник для студентов вузов ж.-д. трансп. / Вл. В. Сапожников, Б. Н. Елкин, И. М. Кокурин. – М. : Транспорт, 2000. – 432 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### Определение толщины тонкопленочных покрытий оптическим интерферометрическим профилометром

#### Цель работы

Изучить методы интерферометрии используемых для измерения высоты, глубины, профиля элементов микроструктур и толщины пленок. Изучить принципы и методику работы на ПОИ-8 и МИИ-4, приобрести практические навыки работы на них.

#### Теоретические сведения

Для контроля рельефа поверхности и оценки размера трехмерных дефектов на поверхности наиболее пригодны *методы интерферометрии*. Основным прибором, использующим интерферометрический принцип при измерениях высоты, глубины, профиля элементов микроструктур и толщины пленок, является широко известный микроинтерферометр Линника МИИ-4 (рис. 4.1). Принцип действия прибора основан на сравнении световых волн, получаемых при отражении когерентных пучков света от контролируемой и эталонной поверхностей.

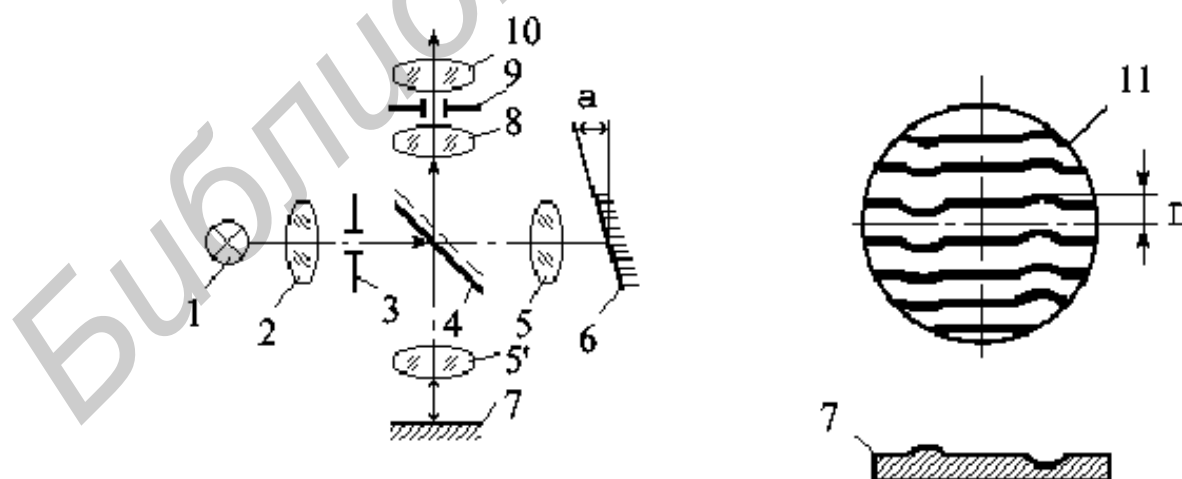


Рис. 4.1. Оптическая схема микроинтерферометра:

- 1 – осветитель; 2 – конденсор; 3, 9 – диафрагмы; 4 – светоделительное полупрозрачное зеркало; 5, 5' – микрообъективы; 6 – эталонное зеркало; 7 – исследуемая поверхность; 8 – 10 – окуляр; 11 – наблюдаемая интерферограмма

Свет от источника 1 проходит через конденсор 2 и диафрагму 3. Зеркало 4 делит его на два когерентных пучка, один из которых фокусируется объективом 5 на эталонное зеркало 6, а другой объективом 5' на контролируемую поверхность 7. После отражения от эталона и изделия пучки проходят через те же элементы схемы и фокусируются линзой 8 в плоскости диафрагмы 9, в которой с помощью окуляра 10 наблюдают интерференционную картину 11 взаимодействия эталонного и рабочего пучков света. При этом наблюдают чередующиеся светлые и темные полосы интерференции, искривленные в соответствии с профилем исследуемой поверхности. С помощью окуляр-микрометра измеряют кривизну полос. Она является количественной характеристикой микронеоднородностей поверхности изделия: искривление на одно расстояние между одноцветными полосами соответствует глубине или высоте дефекта, равной длине волны используемого света.

Интерференционным способом производится измерение неплоскостности стеклянных пластин фотошаблонов. Этому способствует высокая чистота поверхности стекол, позволяющая получить четкую интерференционную картину. Этим способом исследуется поверхность полированных полупроводниковых пластин.

*Метод отражательной интерференции.* На поверхность подложки с пленкой направляется луч света от монохроматического источника (обычно – лазера). На поверхности раздела «окружающая среда-пленка-подложка» луч претерпевает отражение и преломление (рис. 4.2).

Отраженный от поверхности пленки луч  $I_1$  и вышедший из нее луч  $I_2$  имеют оптическую разность хода, пропорциональную удвоенной толщине контролируемой пленки:

$$S = n_2 AD + DC - n_1 BC \sim 2h. \quad (4.1)$$

При нормальном падении луча  $I_0$ :

$$S = 2hn_2. \quad (4.2)$$

Для первого гашения выходного пучка света в результате интерференции лучей  $I_1$  и  $I_2$  необходимо условие:

$$S = \lambda/2, \quad (4.3)$$

откуда можно определить толщину пленки:

$$h = \lambda/4n_2. \quad (4.4)$$

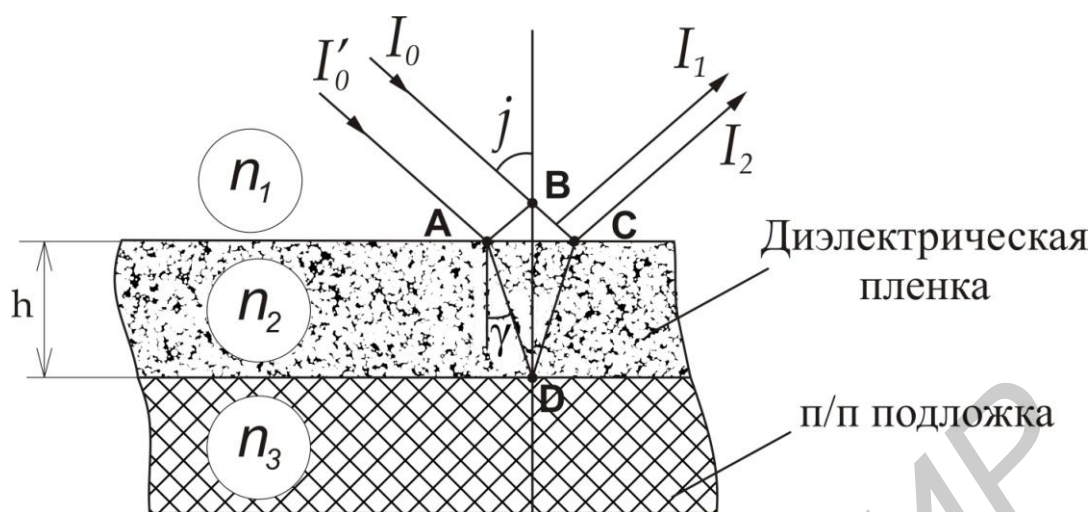


Рис. 4.2. Ход лучей в системе «пленка-подложка» при измерении толщины пленки

Это лежит в основе принципа действия лазерного интерференционного прибора для контроля толщины диэлектрических пленок в процессе их нанесения (рис. 4.3).

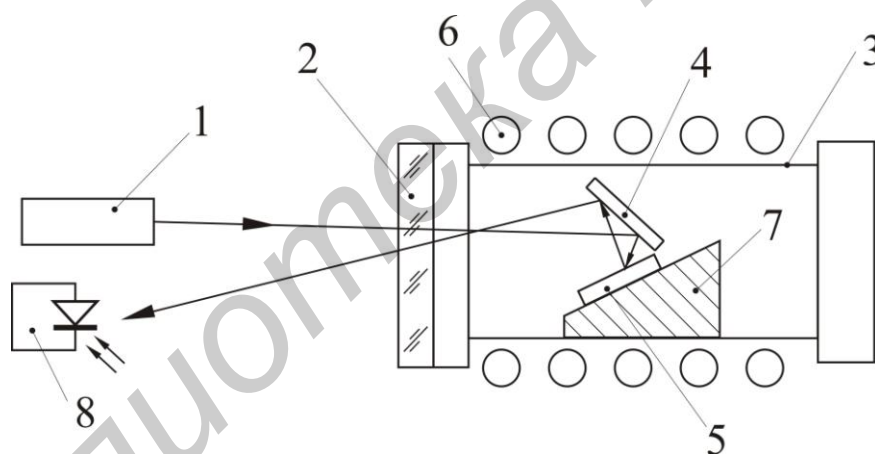


Рис. 4.3. Оптическая схема лазерного интерференционного прибора для контроля толщины диэлектрических пленок:

- 1 – лазер; 2 – оптическое окно; 3 – трубчатый реактор; 4 – зеркало; 5 – пластина;  
6 – ВЧ-индуктор; 7 – графитовый нагреватель; 8 – фотоприемник

Суммарный оптический сигнал после интерференции лучей в процессе роста пленки будет иметь осциллирующую форму (рис. 4.4). Этот сигнал регистрируется и преобразуется в электрический с помощью фотоприемника. Процесс наращивания диэлектрического слоя контролируют по зависимости  $I = f t$ , которая регистрируется либо самописцем, либо графическим дисплеем с памятью. Толщине наносимой пленки, соответствующей расстоянию между

двумя экстремальными точками экспериментальной зависимости  $I = f(t)$ , будет соответствовать разность хода лучей  $I_1$  и  $I_2$ , на которой укладывается половина длины волны используемого монохроматического излучения. Отсчитывая временной интервал от начала процесса и зная длину волны источника излучения и показатель преломления  $n_2$ , по кривой  $I = f(t)$  можно регистрировать текущее значение толщины наносимой на подложку пленки.

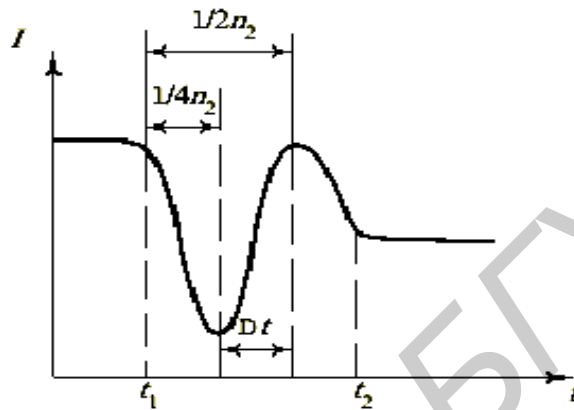


Рис. 4.4. Интенсивность излучения, отраженного от кремниевой пластины в ходе наращивания пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ :  $t_1$  — начало наращивания;  $t_2$  — окончание наращивания;  $t$  — временной интервал, соответствующий шагу

*Визуальный цветовой метод контроля* основан на свойстве тонких прозрачных пленок, нанесенных на отражающую подложку, изменять свой цвет в зависимости от толщины. В основе этого свойства лежит интерференция световых лучей, отраженных от границы раздела «окружающая среда-пленка» и «пленка-подложка».

Данный метод нашел широкое применение в микроэлектронном производстве благодаря простоте и оперативности контроля. Особенно эффективным цветовой метод является в условиях массового производства при известном технологическом режиме наращивания пленки. Контроль производится на воздухе после изъятия полупроводниковых пластин из технологической камеры при воспроизводимых условиях освещения и наблюдения.

Условие существования интерференционных максимумов в отраженном свете, определяющих цвет пластин с пленкой, будет следующим:

$$2hn_2 = p\lambda, \quad (4.5)$$

где  $p = 1, 2, 3$  и т. д. – порядок интерференции.

Если в пределах одного и того же порядка интерференции пленка изменяет свою толщину на  $\Delta h$ , то длина волны  $\lambda$ , соответствующая максимуму отражения, сместится на  $\Delta\lambda$ , т. е.

$$2n2(h + D\Delta h) = p(1 + D\Delta\lambda). \quad (4.6)$$

Из этих выражений следует, что

$$\Delta\lambda / \lambda = \Delta h / h. \quad (4.7)$$

Ощущаемый глазом цветовой интервал соответствует в среднем 30 нм. Тогда для зеленого цвета ( $\lambda = 550$  нм) получим  $\Delta h / h = 30 / 550 = 0,054$ , т. е. визуальный цветовой метод контроля толщины может иметь относительное разрешение по толщине порядка 5 %.

При изменении технологии наращивания пленки цветовая толщина должна быть экспериментально перепроверена и при необходимости откорректирована. Этот же метод применяется и для контроля пленок фоторезиста.

### Техническое описание ПОИ-8

ПОИ-08 (далее – прибор) представляет собой программно-аппаратный комплекс, реализованный на базе микроинтерферометра МИИ-4, оснащенный цифровой программной системой регистрации и обработки информации.

Состав прибора представлен в соответствии с рис. 4.5.

Назначение прибора по прямому применению:

- а) определение высот профиля поверхности в выбранном месте исследования в диапазоне размеров от 10 нм до 5 мкм по области размером до  $300 \times 300$  мкм;
- б) определение планиметрических линейных размеров объектов на цифровых изображениях;
- в) регистрация цифровых цветных изображений исследуемых поверхностей с автоматическим проставлением масштабных шкал.

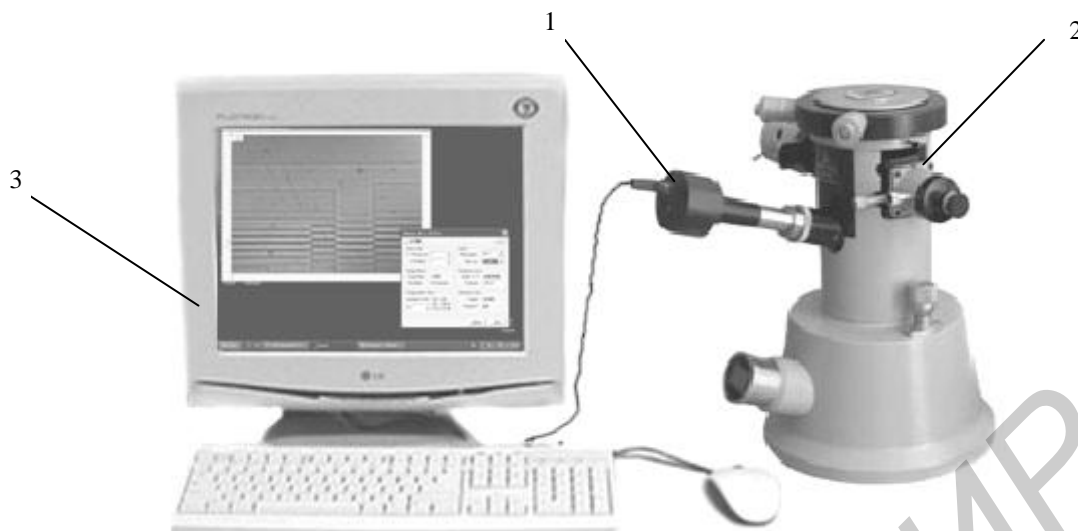


Рис. 4.5. Профилометр оптический интерферометрический ПОИ-08:  
 1 – блок регистрации интерференционной картины (МИИ-4); 2 – модуль регистрации цифровых изображений (цифровой окуляр); 3 – управляющий блок на базе ПК

Электронно-оптическая часть прибора может также использоваться в качестве цифрового окуляра оптических микроскопов и применяться в соответствии с пунктами (б) и (в) основного назначения.

Область применения. Прибор может быть использован в научных организациях, высших учебных заведениях и промышленных предприятиях для решения задач оценки качества обработки поверхностей, определения глубины поверхностных дефектов (субмикронного износа твердых образцов, склерометрических следов и отпечатков инденторов), толщины нанесенных покрытий и пленок, калибровки геометрических стандартов для атомно-силовой микроскопии.

#### Технические данные.

Блок регистрации интерференционной картины (МИИ-4):

- вертикальное разрешение, нм 10;
- максимальная высота измерения, мкм 5;
- максимальное поле зрения, мм 0.32×0.32;
- оптическое увеличение, крат 120.

Модуль регистрации цифровых изображений:

- тип, цветовой формат ПЗС, RGB;
- размер матрицы, пиксел 640×480;
- физический размер (диагональ), мм 6.35;
- интерфейс передачи данных USB.

Программная система управления

см. рис. 4.2.

Условия эксплуатации:

- рабочее напряжения 220 В, 50 Гц;
- температура окружающего воздуха, °С 10–30;
- относительная влажность воздуха, % до 80;
- атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.) 84–107 (630–800).

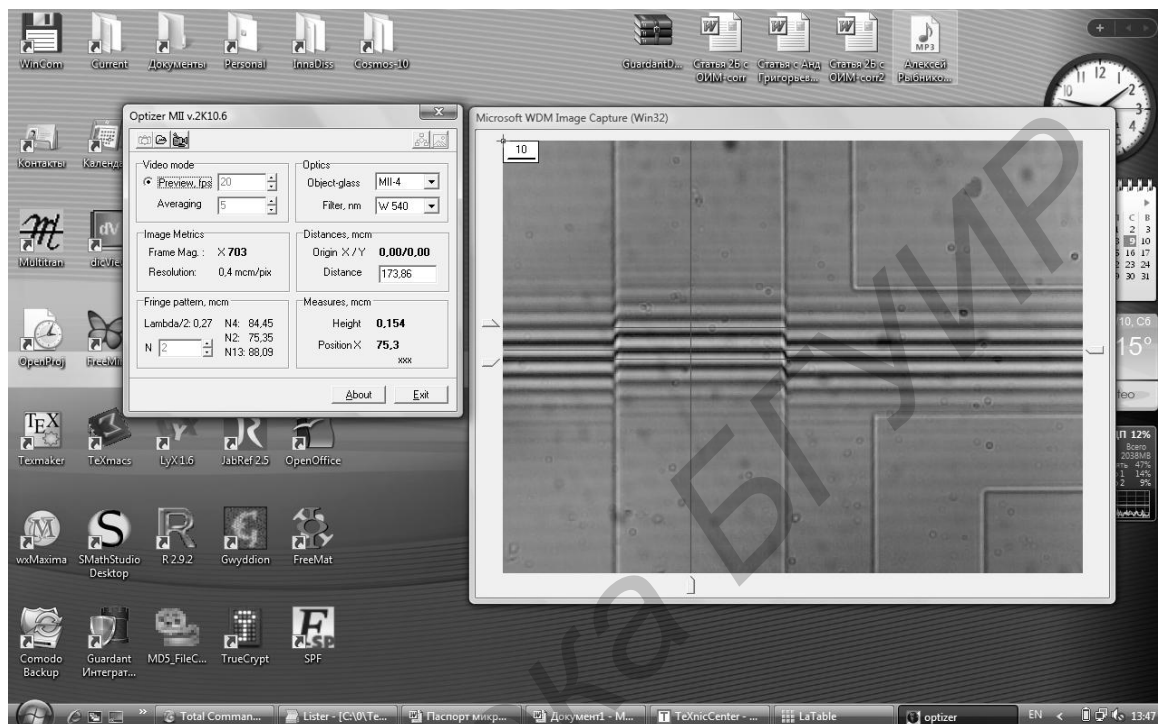


Рис. 4.6. Программная система управления OptizerMII

Прибор реализует абсолютный метод измерения и не требует поверки. Точность результатов определения высот неровностей определяется точностью отсчетов положения интерференционных полос.

*Блок регистрации интерференционной картины* реализован на микроинтерферометре МИИ-4 и модуле регистрации цифровых изображений. Общий вид системы регистрации представлен в соответствии с рис. 4.7, обозначения приведены по тексту.

*Конструкция.* Микроинтерферометр имеет круглое основание (1, рис. 4.7), на котором установлена рамка 2 с матовым стеклом. К верхнему торцу основания привинчена полая цилиндрическая колонка 3, на которой установлен предметный столик 4. При помощи двух микрометрических винтов 5 столик можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях, величину перемещения столика отсчитывают по шкалам барабанов винтов. Также столик можно поворачивать вокруг вертикальной оси и стопорить винтом 6. Измерительный столик прибора имеет координатное перемещение в двух



взаимно перпендикулярных направлениях (по 10 мм каждое) и вращение на  $360^\circ$  относительно вертикальной оси. Цена деления барабана микрометрических винтов столика – 0,005 мм.

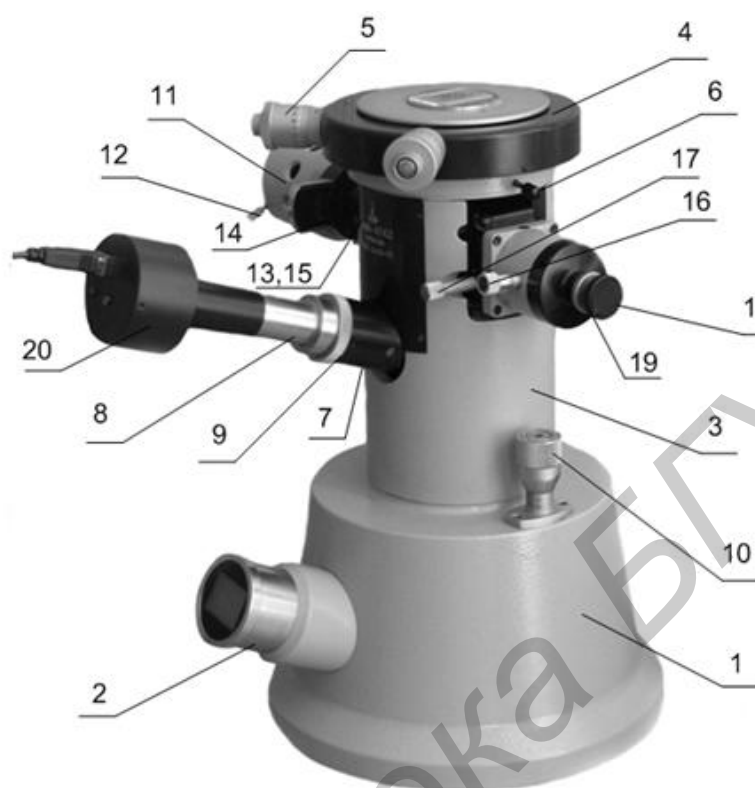


Рис. 4.7. Блок регистрации интерференционной картины с цифровым окуляром

В колонке 3 под углом  $70^\circ$  к вертикальной оси расположен визуальный тубус 7, в отверстие которого устанавливают прикладываемый к микроинтерферометру симметричный окуляр 15х со шкалой или сеткой.

В приборе ПОИ-08 для измерения величины искривления интерференционных полос на наружный диаметр тубуса вместо окуляра или окулярного микрометра 8 (МОВ-1-15х) устанавливается модуль регистрации цифровых изображений 20.

На тубусе имеется кольцо 9, вращением которого можно вводить в оптическую систему или выводить из нее зеркало визуального тубуса. При визуальном наблюдении или измерении зеркало должно быть введено в оптическую систему, а при фотографировании выведено.

Фокусировка микроскопа на объект осуществляется перемещением интерференционной головки при вращении микрометрического винта 10.

Величина вертикального перемещения интерференционной головки может быть отсчитана по шкале барабана микрометрического винта. Интерферен-

ционная головка укреплена на внутреннем стакане микроинтерферометра. Она состоит из левой, средней и правой частей. Левая часть головки включает фонарь 11 с винтами 12 (для центрировки лампы) и трубку 13, в которую вмонтирована осветительная часть системы. В трубке установлена горизонтально выдвигающаяся пластинка 14 с тремя отверстиями. В двух крайних отверстиях этой пластинки закреплены светофильтры разных характеристик (зеленый или желтый) для получения монохроматического света, среднее отверстие свободное и используется при работе в белом свете. Вращением кольца 15 с накаткой изменяется диаметр отверстия апертурной диафрагмы.

В среднюю часть интерференционной головки ввинчен объектив. В корпусе средней части установлены разделительная пластинка и компенсатор. Рукоятка 16 служит для включения шторки, при включении которой лучи не попадают в объектив. В этом случае на микроинтерферометре можно работать как на металлографическом микроскопе. На торце рукоятки 16 нанесена стрелка, указывающая положение шторки.

В правой части головки установлены объектив и эталонное зеркало. Эта часть имеет устройство для изменения ширины и направления интерференционных полос. Ширина полос изменяется вращением винта 17 вокруг его оси. Изменение направления полос производится этим же винтом путем вращения его вокруг оси интерференционной головки. Винт 18 служит для смещения интерференционных полос в поле зрения микроскопа.

*Настройка интерферометрического блока.* Включение интерферометрического блока и его настройка осуществляется согласно Техническому описанию и инструкции к микроинтерферометру Линника МИИ-4. Приведенная ниже информация представлена в справочных целях.

Проведение первичной настройки рекомендуется осуществлять со штатным объект-микрометром.

После включения прибора для получения интерферометрической картины измерений поворотом рукоятки (16, на рис. 4.7) перейти в режим «интерференция» (стрелка на рукоятке 16 должна быть в горизонтальном положении), при этом в поле зрения должны быть видны интерференционные полосы, как это показано в соответствии с рис. 4.8.

С помощью микрометрического винта 10 добиться наиболее резкого изображения полос и исследуемой поверхности. Если при резкой фокусировке на объект наиболее резкие и контрастные интерференционные полосы получились не в центре поля зрения, то следует отвернуть контргайку 19 и, вращая винт 18, привести полосы в центр поля зрения. Затем проверить фокусировку по исследуемой поверхности и закрепить винт 18 контргайкой 19.

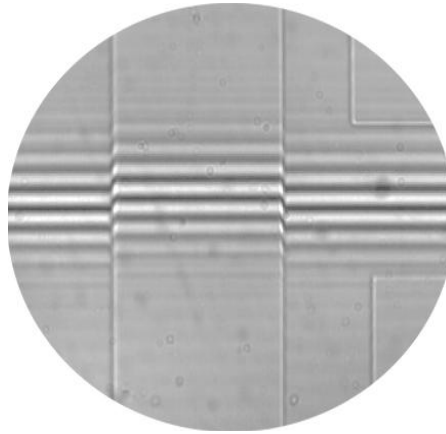


Рис. 4.8. Пример интерференционной картины при белом освещении

Винтом 18 и контргайкой 19 разрешается пользоваться только в случае, описанном выше; в других случаях трогать винт и контргайку не рекомендуется. Для получения большей контрастности полос нужно поворотом кольца 15 несколько уменьшить отверстие апертурной диафрагмы. Вращением винта 17 вокруг оси установить необходимый для работы интервал между полосами. Поворотом винта 17 вокруг оси интерференционной головки установить интерференционные полосы перпендикулярно к штрихам на исследуемой поверхности.

Для работы с монохроматическим светом необходимо включить один из светофильтров перемещением в одно из крайних положений пластинки 14.

*Управляющая программа прибора.* На рис. 4.9 представлен графический интерфейс программной системы с обозначением основных управляющих элементов.

После первого запуска системы необходимо выбрать источник видеосигнала и выбрать наиболее подходящий размер окна вывода видеопотока, его формат и определить режим просмотра. Ниже описаны функции основных элементов управления.

*Выбор источника видеосигнала* обеспечивается драйвером модуля регистрации цифровых изображений и осуществляется в диалоговом окне (рис. 4.10), вызываемом нажатием управляющего элемента (4, рис. 4.9). Диалоговое окно позволяет выбрать источник записи, определить его параметры и настроить цветопередачу изображения.

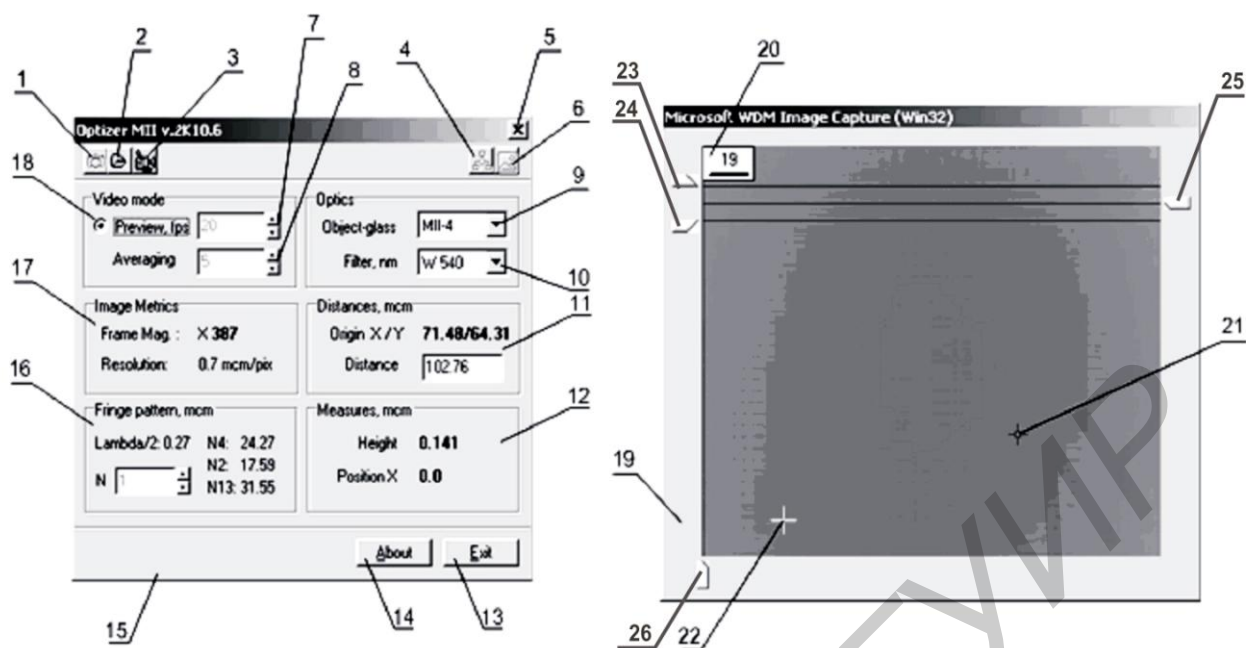


Рис. 4.9. Графический интерфейс программной системы Optizer MII:

- 1 – захват кадра; 2 – запись изображения; 3 – режим просмотра видеопотока;
- 4 – установка источника сигнала; 5 – системная кнопка закрытия программы;
- 6 – установка формата кадра; 7 – установка скорости просмотра видеопотока;
- 8 – число усреднений результирующего изображения; 9 – тип объектива;
- 10 – тип интерференционного фильтра; 11 – значение отсчета измеряемых расстояний;
- 12 – результаты определения высоты; 13 – выход из программы;
- 14 – информация о версии и разработчике программы; 15 – управляющее окно программы;
- 16 – параметры настройки интерферометра; 17 – параметры выводимого изображения;
- 18 – переключение в режим Preview; 19 – окно просмотра видеопотока и захваченного изображения;
- 20 – маркер масштаба изображения; 21 – маркер отсчета расстояний;
- 22 – указатель манипулятора mouse; 23, 24, 25 – указатели положений интерференционных полос N2, N4 и N13 соответственно; 26 – указатель расстояния по оси OX

*Установка формата вывода видеопотока.* Размер изображения устанавливается в диалоговом окне, представленном в соответствии с рис. 4.9. Диалоговое окно вызывается нажатием управляющего элемента (6, рис. 4.9). Система автоматически распознает возможные размеры окна вывода изображения, используя информацию о параметрах видеосистемы компьютера. Выбор формата (размера окна вывода и глубины цвета) осуществляется с помощью кнопок 1–2. Следует отметить, что оптимальный формат кадра для просмотра видеопотока соответствует размеру порядка  $400 \times 300$  пикселей. Задание слишком малого формата затрудняет рассмотрение мелких деталей. Также желательно, чтобы цветовой формат был равен 32 или 24 bit. Если эти опции недо-

ступны, необходимо установить соответствующий режим в настройках видео-адаптера, если они возможны.

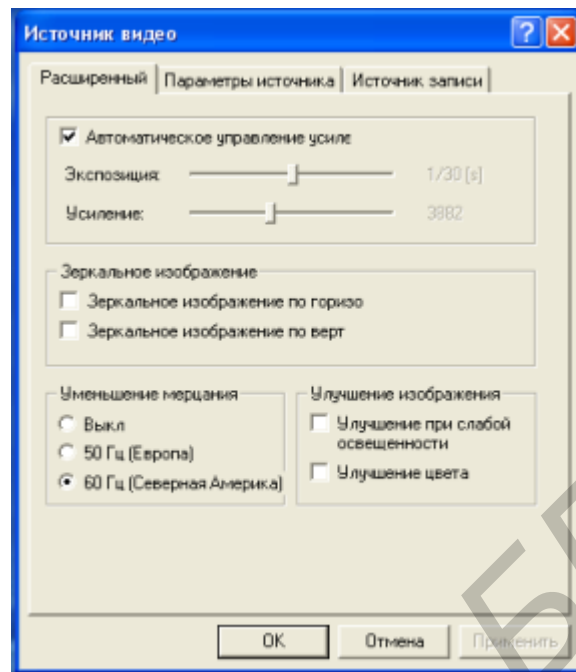


Рис. 4.10. Окно выбора источника видеосигнала

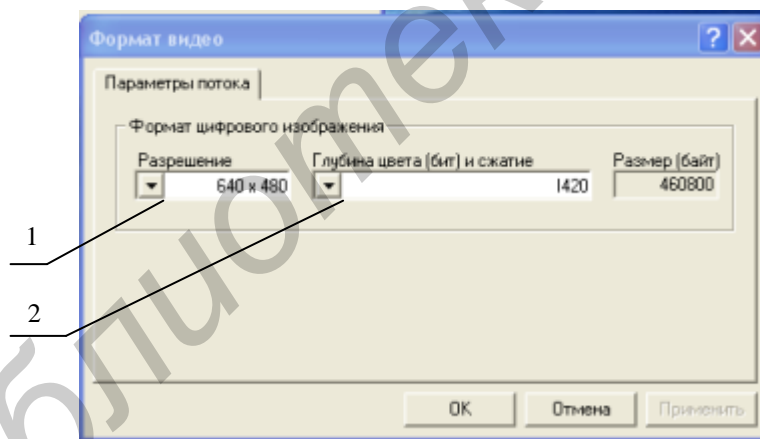


Рис. 4.11. Окно задания формата вывода видеопотока:  
1 – выбор размера изображения; 2 – выбор цветового формата

Формат видеопотока можно изменять в ходе работы, исходя из целей и свойств исследуемого объекта.

*Установка режимов просмотра и захвата кадра.* Просмотр видеопотока в текущей версии системы осуществляется только в режиме «Preview». В данном режиме используются ресурсы процессора и базовой системы графического вывода системы Windows (Graphic Device Interface – GDI). Изображение с

источника видеосигнала оцифровывается, преобразуется в DIB (Device Independent Bitmap) формат и средствами операционной системы выводится в окно вывода программы.

Такое решение обеспечивает наибольшую стабильность работы системы. По этой причине прямая запись в видеосигнале в окне (режим «Overlay») пока не поддерживается из-за возможных конфликтов аппаратных средств с прямым доступом к ресурсам операционной системы.

Имеется возможность устанавливать число кадров, которое будет обработано перед захватом. При нажатии кнопки (3, рис. 4.9) система усредняет число последовательных кадров видеоряда, установленное с помощью управляющего элемента 8. Это позволяет значительно уменьшить шумы на результирующем изображении, улучшив его визуальное восприятие, особенно на малоконтрастных, затемненных изображениях.

Режимы просмотра и захвата кадров можно менять в ходе работы, исходя из целей и свойств исследуемого объекта, условий освещения и качества получаемого изображения.

*Захват кадра* – процедура, аналогичная фотографированию. Из видеопотока отбирается число кадров, заданное управляющим элементом (8, рис. 4.9), кадры усредняются, и результирующее изображение выводится в окно вывода.

Перед захватом кадра необходимо установить параметры оптической системы 9 и 10, при которых производится наблюдение объекта (группа элементов «Optics»). Элемент 9 указывает на тип используемого объектива, а 10 – оптического фильтра.

Для осуществления захвата кадра необходимо нажать управляющий элемент 1. Вывод видеопотока прекращается, и в окне 19 показывается результирующее изображение. При этом в окне вывода 19 появляются управляющие элементы 23, 24, 25, позволяющие задавать параметры, необходимые для расчета высот профиля (изображение должно представлять собой интерференционную картину).

На полученном изображении отображаются также маркер масштаба 20 и маркер отсчета расстояний 21. Маркер масштаба изображения соответствует увеличению наблюдения объекта на дисплее компьютера для выбранного объектива оптического оборудования. Значение объектива можно изменять, выбирая нужный из списка 9. При этом автоматически производится пересчет масштаба и метрик используемых при вычислении расстояний. Программа также учитывает изменение масштаба при изменении размера окна вывода.

В группе элементов «Image metrix» можно получить информацию об увеличении кадра (поле «Frame Mag») и цифровом разрешении изображения (поле Resolution) – сколько микрометров приходится на один пиксель изображения.

*Запись изображения.* Вызов функции записи изображения осуществляется нажатием управляющего элемента (2, рис. 4.9). Элемент активен только после захвата изображения. При нажатии кнопки появляется стандартное окно диалога записи файла (рис. 4.12).

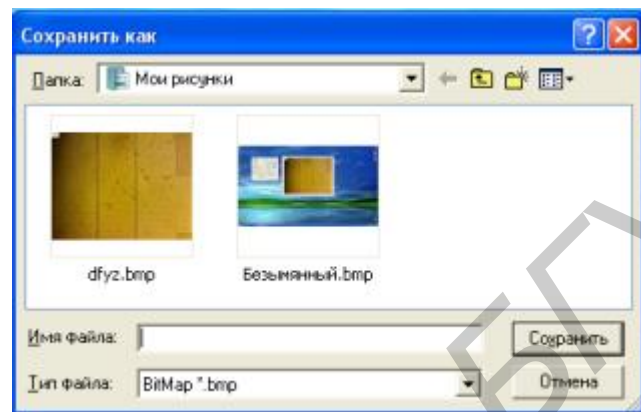


Рис. 4.12. Окно диалога сохранения изображения файла

Пользователю предлагается выбрать (или создать) директорию, где будет сохранено захваченное изображение, задать имя файла и нажать клавишу «Сохранить» для выполнения операции. Изображение записывается в формате BMP. Расширение имени файла можно не задавать. Программа автоматически добавит его, если оно было пропущено или неверно специфицировано.

Имя директория, где сохранено изображение, запоминается. При последующих вызовах функции записи окно диалога автоматически откроет список файлов директория предшествующей операции записи. Эта возможность позволяет избежать многократного выбора нужного места при записи большого количества изображений. Нажатие клавиши «Отменить» отменяет процедуру записи изображения, и программа возвращается в режим просмотра захваченного изображения.

Для сохранения изображения можно использовать также буфер обмена (Clipboard) системы Windows. При выполнении операции захвата, копия изображения помещается в системный буфер и становится доступной для всех программ, поддерживающих обмен данными через данный ресурс операционной системы. Для использования этой возможности необходимо, чтобы было запущено соответствующее программное обеспечение. Например, если программа

«MS Word» находится в работе, выполнение операции Правка/Вставить (Ctrl + V), приведет к вставке изображения в открытый документ.

### **Порядок выполнения работы**

1. Получить у преподавателя образцы для измерения.
2. Подготовить профилометр оптический интерферометрический ПОИ-8 к работе.

Подготовка прибора к работе включает в себя следующие операции:

- 2.1. Подготовка и установка исследуемого образца.
- 2.2. Включение и настройка блока регистрации интерференционной картины на базе интерферометра МИИ-4.
- 2.3. Запуск управляющего блока и программной системы *OptizerMII* и регистрация изображения.
- 2.4. Анализ изображения, включающий:
  - а) измерение высот неровностей по интерферометрической картине;
  - б) определение линейных планиметрических размеров объектов.

Подготовка образца заключается в очистке исследуемой поверхности от следов пыли и других загрязнений и установке на предметный столик микроинтерферометра МИИ-4 исследуемой поверхностью вниз.

Рекомендуется при проведении точных измерений включать осветительную лампу за 10 мин до начала работы. При настройке можно заменить модуль регистрации цифровых изображений (цифровой окуляр) на штатный объект-микрометр, входящий в состав интерферометра МИИ-4. По окончании настройки установить цифровой окуляр обратно.

Включение управляющего блока (компьютера) производится в соответствии с инструкцией его эксплуатации. Запуск программной системы *OptizerMII* производится любыми возможными в операционной системе способами запуска исполняемого файла «OptizerMII.exe». При успешном запуске на экране монитора должны появиться окна управления и просмотра видеопотока.

3. Измерить толщину пленки на тестовом образце.
4. Определить линейные размеры элемента топологии интегральной микросхемы.
5. Нарисовать эскиз топологии интегральной микросхемы с указанием измеренных размеров элемента.



## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Теоретическая часть.
3. Результаты измерений толщин образцов.
4. Чертеж топологии ИМС.
5. Выводы.

### Контрольные вопросы и задания

1. Состав, назначение и область применения прибора.
2. Конструкция микроинтерферометра МИИ-4.
3. Процесс подготовки ПОИ-8 к работе.
4. Процесс измерения высоты неровностей.
5. Определение линейных размеров объектов.
6. Технические характеристики МИИ-4 и ПОИ-8.
7. Принцип измерения неровностей МИИ-4.
8. Метод отражательной интерференции.
9. Визуальный цветовой метод контроля.
10. Голографическая интерферометрия.

### Литература

1. Домаренок, Н. И. Физические основы диагностики и неразрушающего контроля качества МЭА / Н. И. Домаренок : учеб. пособие по дисциплине «Диагностика и контроль качества» для студ. спец. «Технология МЭА». – Минск : БГУИР, 2001. – 82 с.
2. Ермолов, И. Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества: учеб. пособие для инженерно-техн. спец. вузов / И. Н. Ермолов, Ю. Я. Останин. – М. : Высш. шк., 2006. – 368 с.
3. Измерение и контроль в микроэлектронике / под ред. А. А. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1984.
4. Неразрушающий контроль элементов и узлов РЭА / под ред. Б. Е. Бердичевского. – М. : Сов. радио, 2000. – 297 с.
5. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2 кн. / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2001.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### Исследование асинхронных исполнительных двигателей с полым немагнитным ротором

#### Цель работы

Изучить устройство, принцип работы и исследовать основные характеристики асинхронных двигателей с полым немагнитным ротором.

#### Теоретические сведения

Исполнительные – электрические микродвигатели, преобразующие подводимый электрический сигнал в пропорциональную угловую скорость вращающегося ротора. Асинхронные микродвигатели, применяемые в качестве исполнительных, должны отвечать ряду требований, предъявляемых к исполнительным двигателям непрерывного вращения в автоматических системах. К основным требованиям относятся:

- линейность механических характеристик и обеспечение устойчивой работы во всем диапазоне угловых скоростей;
- линейная зависимость угловой скорости ротора от электрического сигнала управления и широкий диапазон регулирования угловой скорости;
- отсутствие самохода (явление самохода заключается в том, что двигатель развивает вращающий момент и его ротор вращается при отсутствии сигнала управления);
- высокое быстродействие;
- малая мощность управления при значительной механической мощности на валу (требование вызвано ограниченной мощностью источников сигнала управления, в основном, электронных);
- надежность в работе;
- малые габариты и вес.

*Конструкция.* В качестве исполнительных асинхронных микродвигателей (ИАД) в большинстве случаев используются двухфазные микродвигатели (рис. 5.1).

На их статоре имеются две обмотки, сдвинутые в пространстве на угол  $\gamma$  возбуждения  $B$  и управления  $U$ . Число витков в этих обмотках в общем случае разное. Амплитуда или фаза напряжения управления и пространственный угол

$\gamma$  между обмотками определяют угловую скорость ротора и механическую мощность, развиваемую микродвигателем.

По сравнению с асинхронными двигателями общего назначения исполнительные асинхронные микродвигатели имеют повышенное активное сопротивление ротора. Это связано с требованиями устойчивости работы исполнительных микродвигателей во всем рабочем диапазоне угловых скоростей и отсутствием параметрического самохода.

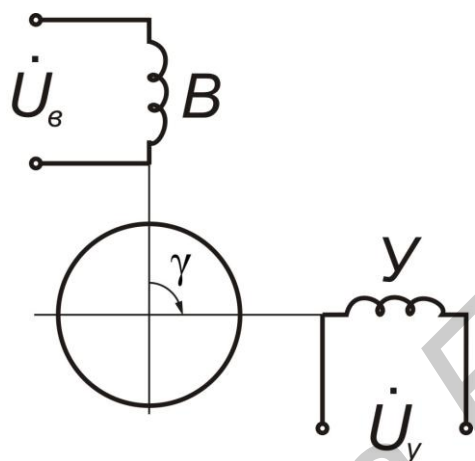


Рис. 5.1. Двухфазный микродвигатель

В схемах автоматики наибольшее применение получили малоинерционные исполнительные двигатели с полым немагнитным ротором (рис. 5.2).

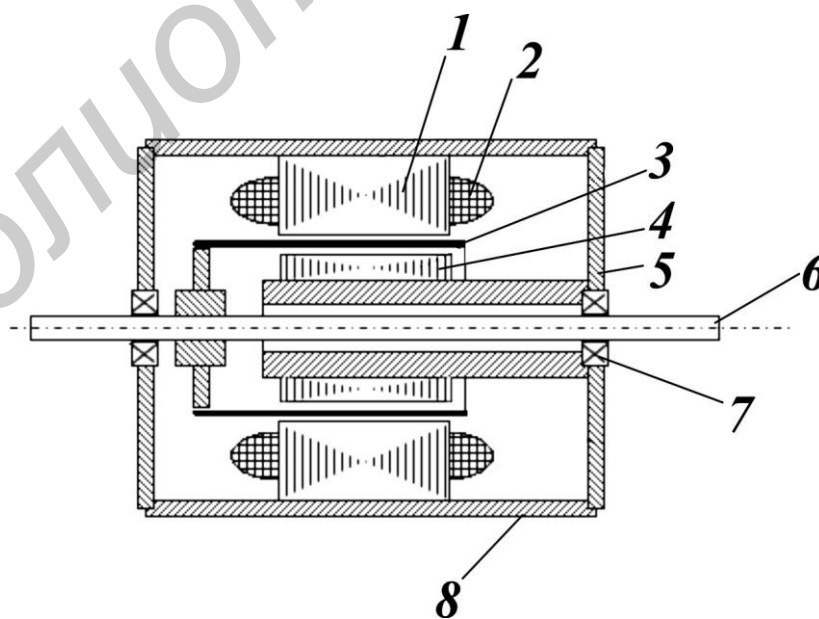


Рис. 5.2. Конструкция асинхронного двигателя с полым немагнитным ротором

Внешний статор 7, закрепленный в корпусе 8, ничем не отличается от статора обычного асинхронного микродвигателя. В пазах статора располагают две обмотки 2: возбуждения и управления. Внутренний статор 4, набираемый из листов электротехнической стали на цилиндрическом выступе 5 одного из подшипниковых щитков, служит для уменьшения магнитного потока, проходящего через воздушный зазор.

В воздушном зазоре между внешним и внутренним статорами находится полый ротор 3, выполненный в виде тонкостенного стакана из немагнитного материала, чаще всего – из сплавов алюминия. Дно ротора жестко укрепляют на валу 6, который вращается в подшипниках 7, расположенных в подшипниковых щитах. Толщина стенок ротора в зависимости от мощности двигателя колеблется в пределах от 0,1–1 мм. Полый ротор имеет очень малую массу и, следовательно, незначительный момент инерции.

В микромашинах мощностью в единицы ватт и менее обмотки возбуждения и управления часто размещают в пазах внутреннего статора.

Полый немагнитный ротор в отличие от ротора других типов обладает незначительным индуктивным сопротивлением рассеяния, что повышает линейность характеристик двигателя. Гладкая цилиндрическая поверхность такого ротора способствует снижению уровня шумов, создаваемых двигателем. Отсутствие радиальных сил притяжения ротора к статору и уменьшение массы ротора и, соответственно, момента трения в подшипниках обеспечивают уменьшение напряжения трогания.

Недостаток машин с полым немагнитным ротором – большой немагнитный зазор, состоящий из двух воздушных зазоров: между внешним статором и ротором и между ротором и внутренним статором (каждый до 0,25 мм), а также из немагнитной стенки самого ротора.

Из-за большого немагнитного зазора, общая величина которого между внешним и внутренним статорами составляет 0,5–1,5 мм, эти машины имеют значительный намагничивающий ток (0,8 – 0,9 номинального) и низкий коэффициент мощности. Большое значение намагничивающего тока приводит к большим электрическим потерям в обмотках двигателя и значительно снижает его КПД.

Микромашины с полым немагнитным ротором менее надежны при высоких температурах, вибрации и ударах, так как вероятность деформации полового немагнитного ротора в указанных условиях выше, чем ротора типа «беличьей клетки».

*Принцип работы.* Принцип действия исполнительного асинхронного микродвигателя не отличается от принципа действия исполнительного асин-

хронного двигателя. Вращающееся магнитное поле статора, создаваемое в результате взаимодействия МДС  $F_y$ , обмоток  $U$  и  $B$ , является круговым при соблюдении условий:

- обмотки фаз имеют одинаковое число витков и сдвинуты в пространстве на электрический угол  $\gamma_s = 2\pi / m = 90^\circ$ ;
- токи обмоток имеют одинаковую амплитуду и частоту и сдвинуты во времени на угол  $\beta = 2\pi / m = 90^\circ$ ;
- $F_y = F_\phi$ , здесь  $m$  – число обмоток статора.

Нарушение любого из этих условий приводит к тому, что поле становится эллиптическим, т. е. конец вектора магнитного потока описывает не окружность, а эллипс. Это значит, что значение суммарного магнитного потока  $\Phi$  в процессе вращения изменяется.

Эллиптическое поле создает меньший вращающий момент, чем круговое такой же амплитуды. Его можно представить как сумму двух неравных по амплитуде круговых полей, вращающихся с синхронной угловой скоростью в противоположные стороны (рис. 5.3, а).

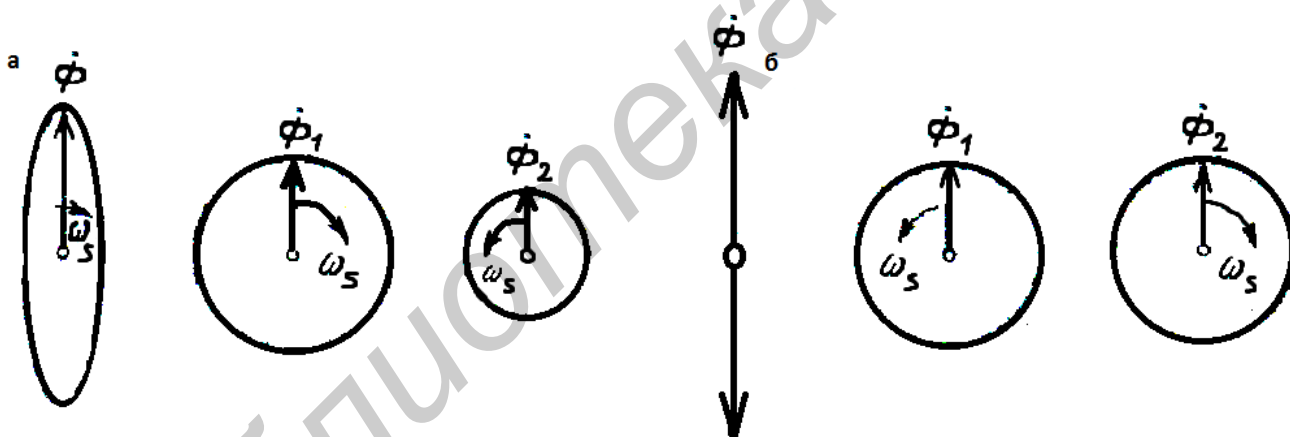


Рис. 5.3. Конфигурация магнитных полей в асинхронном двигателе с полым немагнитным ротором

Круговое поле  $\Phi_1$ , вращающееся в одном направлении с эллиптическим, называют прямым; второе поле  $\Phi_2$ , вращающееся в противоположном направлении, обратным.

Прямое поле создает вращающий момент двигателя, а обратное – тормозящий момент. С увеличением эллиптичности поля за счет изменения углов  $\beta$  и  $\gamma$  или уменьшения МДС, одной из обмоток статора прямая составляющая поля и момент убывают, а обратная составляющая возрастает. Уменьшение ре-

зультирующего вращающего момента при неизменном моменте нагрузки снижает угловую скорость ротора. Появление обратного поля обуславливает увеличение потерь, уменьшение механической мощности и КПД.

Увеличение МДС одной из обмоток статора по сравнению со значением, соответствующим круговому полю, приводит к появлению эллиптического поля, амплитуда которого больше, чем кругового. При этом возрастают обе составляющие поля, и в некотором диапазоне возможно увеличение результирующего вращающего момента по отношению к исходному моменту кругового поля. Однако такое увеличение МДС статора связано с превышением напряжения и тока номинальных значений, соответствующих круговому полю. Это не всегда допустимо, так как вызывает увеличение потерь и дополнительный нагрев двигателя и может привести к насыщению магнитопровода и пробоем изоляции.

Как только не выполняется хотя бы одно из условий кругового поля, т. е.  $\beta = 0$ , или  $\gamma_s = 0$ , или  $I_e = 0$ , или  $I_y = 0$ , поле статора становится пульсирующим, и двигатель не развивает вращающего момента при неподвижном роторе. Для объяснения этого явления заменим пульсирующее магнитное поле  $\Phi$  (рис. 5.3, б) двумя полями  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , вращающимися в противоположные стороны с синхронной угловой скоростью  $\omega_s$  и имеющими амплитуды, равные половине амплитуды пульсирующего поля.

При неподвижном роторе оба поля вращаются относительно ротора с синхронной угловой скоростью. Каждое из них наводит в роторе токи, равные по амплитуде, вследствие равенства полей и относительных скоростей. Возникают равные по модулю вращающие моменты, направление которых противоположно, как и направление полей. Результирующий момент равен нулю и, ротор во вращение прийти не может.

Если поле статора становится пульсирующим при вращении ротора в какую-либо сторону, то при определенных условиях двигатель может продолжать развивать вращающий момент, так как скольжение его ротора относительно прямого и обратного полей будет неодинаковым. Поле статора в исполнительном асинхронном двигателе становится пульсирующим при снятии сигнала управления. Следовательно, ротор двигателя может продолжать вращаться при снятом сигнале управления, что недопустимо для исполнительных двигателей. Это явление называется параметрическим самоходом.

*Способы управления или способы регулирования угловой скорости ротора исполнительного асинхронного микродвигателя* вытекают из теории о форме вращающегося магнитного поля. Изменяя амплитуду напряжения управления

$U_y$  и углы  $\beta$  и  $\gamma$  отдельно и одновременно, воздействуют на форму магнитного поля статора и тем самым на угловую скорость ротора.

*Амплитудный способ управления.* Обмотку возбуждения  $B$  подключают к сети переменного тока с номинальным напряжением  $U_1$  (рис. 5.4, а).

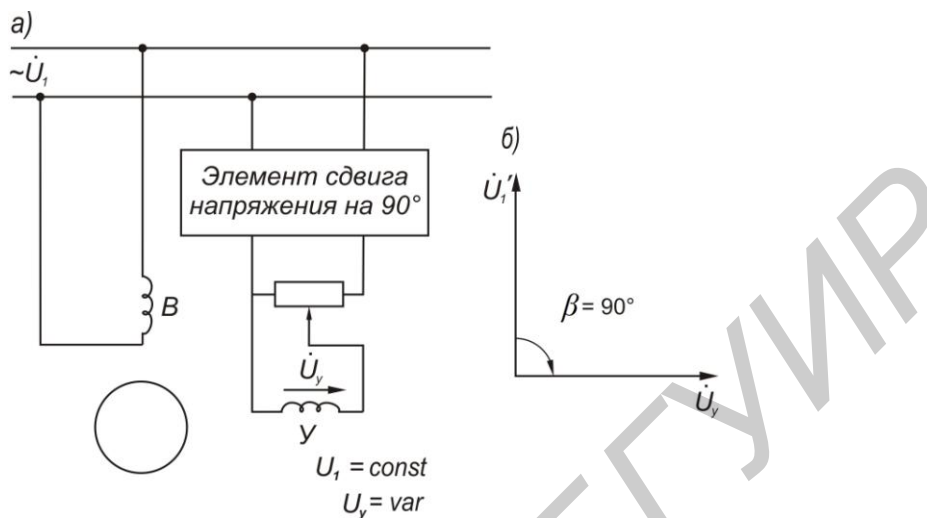


Рис. 5.4. Амплитудный способ управления

На обмотку управления  $Y$  подается сигнал напряжения управления  $U_y$ , сдвинутый по фазе относительно напряжения возбуждения  $U_1$  на угол  $\beta = 90^\circ$  (рис. 5.4, б). Управление угловой скоростью ротора осуществляется изменением амплитуды напряжения управления при неизменной его фазе.

При равенстве приведенных напряжений управления и возбуждения ( $U_y = U_1$ ) эффективный коэффициент сигнала

$$ae = \frac{a}{kt} = 1, \quad (5.1)$$

где  $ae = U_y / U_1$  – коэффициент сигнала при амплитудном управлении;  
 $kt = \omega_{y,\text{ЭФ}} / \omega_{B,\text{ЭФ}}$  – коэффициент трансформации обмоток статора.

При  $ae = 1$  поле статора в двигателе круговое. С изменением напряжения управления эффективный коэффициент сигнала становится отличным от единицы, а поле – эллиптическим. При  $ae = 0$ , т. е. снятом сигнале управления, поле статора пульсирующее.

*Фазовый способ управления.* Обмотку возбуждения  $B$  подключают к сети переменного тока с номинальным напряжением  $U_1$  (рис. 5.5, а).

На обмотку управления  $Y$  подается напряжение, номинальное по значению и изменяемое по фазе относительно напряжения возбуждения (рис. 5.5, б). Номинальным называется такое напряжение управления, которое соответству-

ет равенству  $U_y = U_1$ . Управление угловой скоростью ротора осуществляется изменением фазы напряжения управления (угла  $\beta$ ). За коэффициент сигнала принимают  $\sin\beta$ . При  $\sin\beta = 1$  вращающееся магнитное поле статора круговое; при  $1 > \sin\beta > 0$  – эллиптическое, при  $\sin\beta = 0$  – пульсирующее.

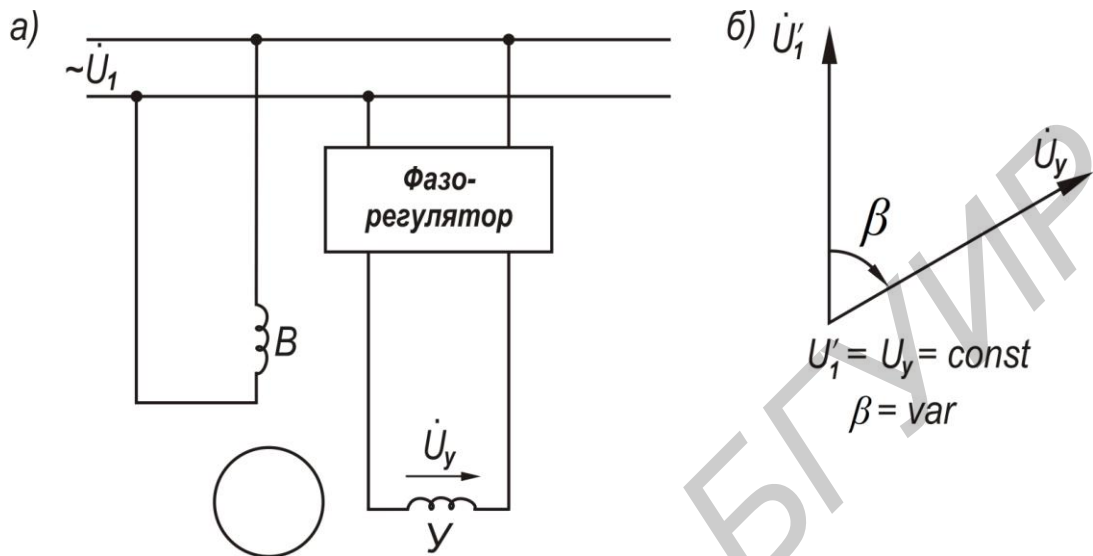


Рис. 5.5. Фазовый способ управления

*Пространственный способ управления* (рис. 5.6). Обмотку возбуждения  $B$  подключают к сети переменного тока с номинальным напряжением  $U_1$ . На обмотку управления  $Y$  подается номинальное напряжение, сдвинутое по фазе относительно напряжения возбуждения на  $90^\circ$  (см. рис. 5.6).

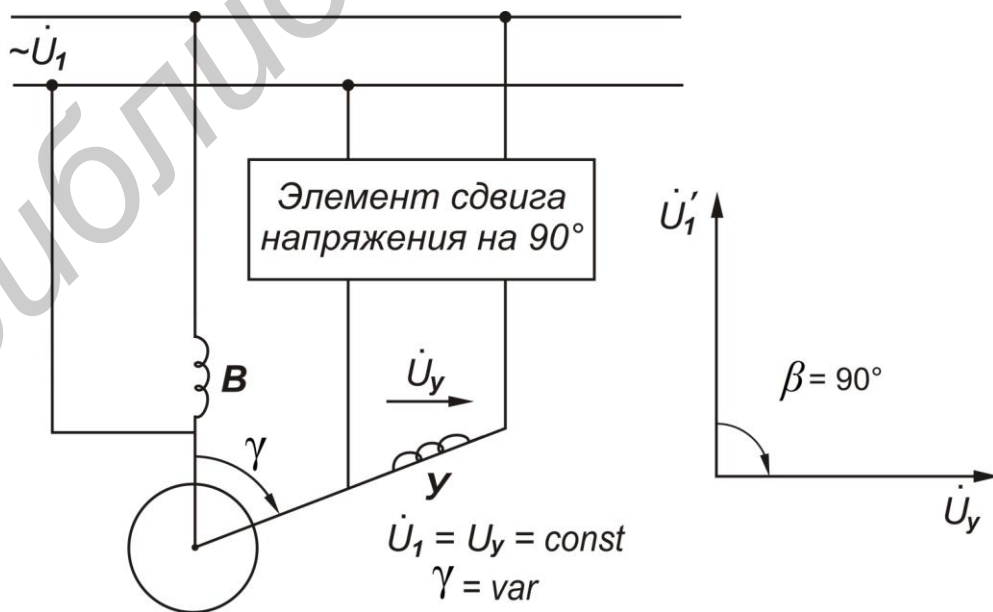


Рис. 5.6. Пространственный способ управления



Управление угловой скоростью ротора производится за счет изменения пространственного угла  $\gamma$  сдвига обмоток возбуждения  $B$  и управления  $U$ . За коэффициент сигнала принимают  $\sin \gamma\varepsilon$  (см. рис. 5.6). При  $\sin \gamma\varepsilon = 1$  вращающееся магнитное поле статора круговое; при  $1 > \sin \gamma\varepsilon > 0$  – эллиптическое; при  $\sin \gamma\varepsilon = 0$  – пульсирующее.

*Амплитудно-фазовый способ управления с конденсатором в цепи возбуждения.* Обмотку управления  $U$  подключают к сети переменного тока через регулятор напряжения; напряжение управления  $U_y$  совпадает по фазе с напряжением сети  $U_1$  (рис. 5.7, а).

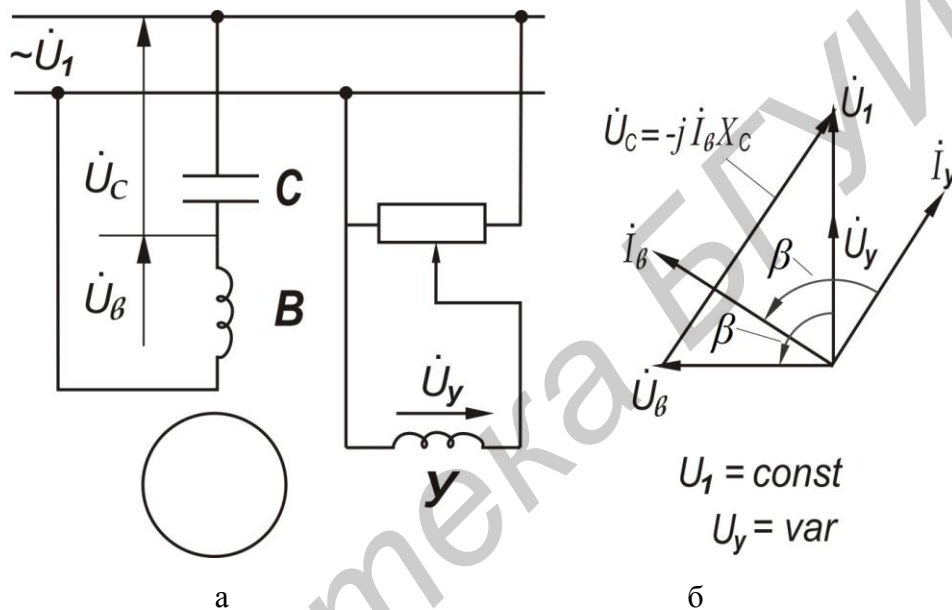


Рис. 5.7. Амплитудно-фазовый способ управления с конденсатором в цепи возбуждения

Сдвиг по фазе тока, а следовательно, и напряжения на обмотке возбуждения по отношению к обмотке управления осуществляется конденсатором  $C$ , который включают последовательно с обмоткой возбуждения  $B$ . Управление двигателем производится за счет изменения амплитуды напряжения управления.

Несмотря на то, что фаза напряжения управления не изменяется (совпадает с фазой напряжения сети), при изменении напряжения управления одновременно изменяются значение и фаза напряжения возбуждения  $U_B$ . То же самое происходит и при изменении угловой скорости ротора за счет изменения момента нагрузки при неизменном напряжении управления. Это объясняется тем, что напряжение возбуждения  $U_B$  равно геометрической разности напряжений сети  $U_1$  и на конденсаторе  $U_c$  (рис. 5.7, б):

$$U_e = U_1 - U_c. \quad (5.2)$$

Напряжение на конденсаторе  $U_c$  при изменении напряжения управления или угловой скорости ротора меняется вследствие изменения тока в цепи возбуждения, который является функцией скольжения и коэффициента сигнала:

$$U_c = jI_e X_c, \quad (5.3)$$

следовательно, меняется по значению и фазе напряжение на обмотке возбуждения  $U_B$ . Поскольку круговое поле существует в двигателе только при соблюдении условий  $U_e = jU_{ey}$  при заданном значении емкости конденсатора в цепи возбуждения, круговое поле возможно только при строго определенном коэффициенте сигнала  $\alpha_0 = U_{y0}/U_1$  и определенном значении скольжения  $s$ . Наведение ЭДС в роторе возможно только при неравенстве угловых скоростей ротора  $\omega_r$  и магнитного потока статора  $\omega_s$ . Условие  $\omega_r \neq \omega_s$  является обязательным для любого режима работы асинхронной машины. В качестве характеристики этого неравенства введено понятие скольжения  $s = (\omega_r - \omega_s)/\omega_s$ , где  $\omega_r$  теоретически изменяется в диапазоне  $(-\infty, +\infty)$ .

Реверсирование исполнительных асинхронных микродвигателей при амплитудном и конденсаторном способах управления производят изменением фазы, напряжения управления на  $180^\circ$ , например, путем переключения выводов обмотки  $U$ . При фазовом и пространственном способах управления реверсирование осуществляют изменением знака угла  $\beta$  или  $\gamma$ . В любом из рассмотренных случаев поле статора начинает вращаться в противоположную сторону, и изменяется направление вращения ротора.

*Характеристики.* Механическая характеристика – зависимость момента, развиваемого двигателем, от скорости его вращения  $M = f(n)$  при постоянном коэффициенте сигнала.

Регулировочная характеристика – зависимость скорости вращения двигателя от напряжения управления (коэффициента сигнала)  $n = f(U_y)$  при постоянном моменте на валу.

### Порядок выполнения работы

1. Снять механическую характеристику двигателя при сдвиге токов в обмотках конденсатором.

Для этого:

а) собрать схему согласно рис. 5.8;

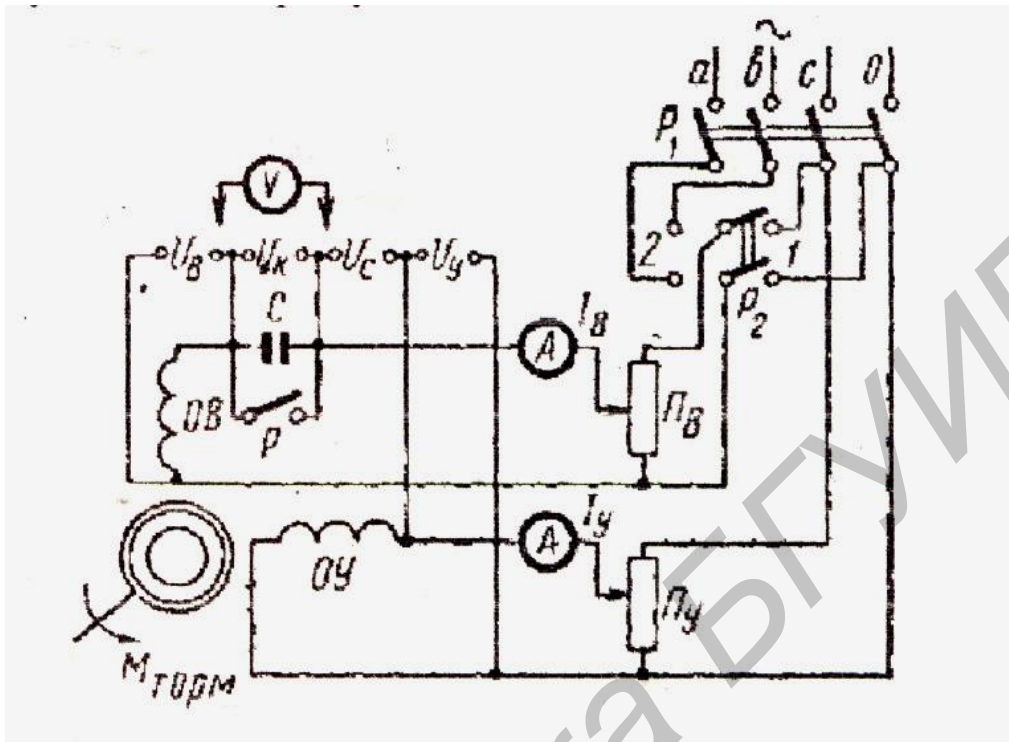


Рис. 5.8. Схема лабораторной установки

б) подключить при разомкнутом рубильнике  $P$  номинальную для данного двигателя емкость  $C_n$ ;

в) включить рубильник  $P$  в положение 1 и потенциометром  $P_в$  установить номинальное напряжение сети  $U_{с.н} = 110\text{В}$ , а потенциометром  $P_у$  номинальное напряжение – управления  $U_{у.н} = 110\text{В}$ . При этих режимах коэффициент сигнала  $\alpha_0 = U_{у.н} / U_{с.н} = 1$  и номинальная емкость обеспечивают при пуске круговое поле и, следовательно, максимальный вращающий момент;

г) изменять, поддерживая постоянно установленных напряжений, нагрузочный момент двигателя от нуля до максимального (при  $P = 0$ ) с помощью тормозящего устройства и записать показания приборов;

д) повторить опыт при значении коэффициента сигнала  $a = 0.5\alpha_0$ , который получают установкой напряжения управления, равного  $0.5 U_{у.н}$ , при неизменном напряжении сети;

е) построить графики зависимостей  $M_0 = f(n)$  и  $M_{0.5} = f n$ .

2. Снять регулировочные характеристики двигателя.

Для этого:

а) выставить с помощью потенциометра  $P_e U_y$  номинальное напряжение сети  $U_{c.n} = 110\text{В}$  и поддерживать его постоянным в процессе проведения опыта;

б) снять зависимость  $n = f(U_y)$  изменяя напряжение управления  $P_e U_y$  с помощью потенциометра  $P_y$  от 0 до 110В при отсутствии нагрузки на валу двигателя;

в) установить с помощью тормозящего устройства нагрузочный момент  $M = 0,5M_{\max}$  и повторить опыт;

г) построить графики зависимостей  $n = f(U_y)$  при  $M = 0$  и  $M = 0,5 M_{\max}$ .

3. Проверить имеет ли двигатель самоход.

Для этого:

а) включить схему при отсутствии нагрузки на валу и номинальных напряжениях сети и управления;

б) снять потенциометром  $P_y$  напряжение управления и проверить имеет ли двигатель самоход или нет, т. е. вращается ли при этом ротор или нет.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты экспериментов.
4. Выводы.

### Контрольные вопросы и задания

1. Что такое «асинхронный двигатель»?
2. Где применяются асинхронные двигатели с полым ротором?
3. Назовите основные достоинства и недостатки асинхронных двигателей с полым ротором.
4. Принцип работы асинхронных двигателей с полым ротором.
5. Конструкция асинхронных двигателей с полым ротором.
6. Поясните принципы управления асинхронных двигателей с полым ротором.
7. Что такое «самоход двигателя»?
8. Назовите основные характеристики асинхронных двигателей с полым ротором.

## Литература

1. Пегашкин, М. В. Линейные асинхронные двигатели для торможения прокатных изделий / М. В. Пегашкин. – Екатеринбург, 2003. – 311 с.

2. Петриков, Л. В. Асинхронные электродвигатели. Обмоточные данные. Ремонт / Л. В. Петриков. – М. : Энергоиздат, 2001. – 496 с. :

3. Коськин, Ю. П. Линейные асинхронные двигатели : учеб. пособие / Ю. П. Коськин. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. – 40 с.

4. Лихачев, В. Л. Электродвигатели асинхронные / В. Л. Лихачев. – М. : СОЛОН-Р, 2002. – 303 с.

Библиотека БГУИР

*Учебное издание*

**Достанко** Анатолий Павлович  
**Голосов** Дмитрий Анатольевич  
**Завадский** Сергей Михайлович и др.

**ДИАГНОСТИКА  
ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редакторы *А. В. Бас, И. В. Ничипор*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 14.01.2014. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 4,4. Тираж 100 экз. Заказ 635.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6