

**ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «ОБРАЗОВАНИЕ»  
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ**

---

**В.В. АНДРЕЕВ, Т.К. ЧЕХЛОВА, Д.В. ЧУПРОВ**

**ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ  
В ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

**Учебное пособие**

**Москва**

**2008**

**«Создание комплекса инновационных образовательных программ  
и формирование инновационной образовательной среды,  
позволяющих эффективно реализовывать государственные интересы РФ  
через систему экспорта образовательных услуг»**

Экспертное заключение –

зав. кафедрой теоретических основ радиотехники технологического института  
Южного Федерального университета в г. Таганроге  
доктор физико-математических наук, доцент *С.Л. Недосеев*

**Андреев В.В., Чехлова Т.К., Чупров Д.В.**

Измерения и приборы в физическом эксперименте: Учеб. пособие. – М.:  
РУДН, 2008. – 356 с.

Цель пособия – обеспечение базовой подготовки в области физического эксперимента; введение в теорию, методику и практику современного физического эксперимента. Материал пособия носит междисциплинарный характер и находится на стыке различных областей экспериментальной физики. Содержание направлено на приобретение студентами глубоких и современных знаний для самостоятельной работы при планировании и проведении физического эксперимента в рамках магистерской программы, затрагивающей наиболее динамично развивающиеся направления прикладной физики.

Предназначено для студентов третьего курса бакалавриата, обладающих базовыми знаниями по физике и математике в объеме программы бакалавриата факультета физико-математических наук РУДН, соответствующей федеральному образовательному стандарту.

*Учебное пособие выполнено в рамках инновационной образовательной программы Российского университета дружбы народов, направление «Комплекс экспортноориентированных инновационных образовательных программ по приоритетным направлениям науки и технологий», и входит в состав учебно-методического комплекса, включающего описание курса, программу и электронный учебник.*

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>7</b>
<b>1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ .....</b>	<b>8</b>
1.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ.....	8
1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ .....	11
1.2.1. Качественные и количественные измерения.....	11
1.2.2. Классификация по способу получения результата .....	13
1.2.3. Статические и динамические измерения .....	14
1.2.4. Классификация по точности .....	14
1.3. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ .....	15
1.3.1. Международная система единиц физических величин.....	16
1.3.2. Дополнительные единицы СИ .....	17
1.3.3. Производные единицы СИ.....	17
1.3.4. Кратные и дольные единицы .....	20
1.4. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	22
1.4.1. Абсолютная и относительная погрешности .....	22
1.4.2. Систематические и случайные погрешности.....	23
1.4.3. Методические, инструментальные и субъективные погрешности .....	25
1.4.4. Аддитивные и мультипликативные погрешности .....	26
1.4.5. Статические и динамические погрешности .....	26
1.5. ОЦЕНКА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ.....	27
1.6. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	31
1.6.1. Таблицы.....	32
1.6.2. Графики .....	33
1.6.3. Гистограммы .....	43
1.6.4. Суммарная погрешность измерений.....	45
1.6.5. Погрешности косвенных измерений.....	47
1.6.6. Запись окончательного результата измерения .....	49
<b>2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.....</b>	<b>51</b>
2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ .....	51
2.1.1. Электроизмерительные и радиоизмерительные приборы.....	51
2.1.2. Классификация методов измерений.....	54

2.2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ И НИЗКОЧАСТОТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ	59
2.3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРИБОРОВ, ИЗМЕРЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЕ И СИЛУ ТОКА	63
2.3.1. <i>Электромеханические приборы</i> .....	63
2.3.2. <i>Магнитоэлектрические приборы с преобразователями переменного тока в постоянный</i> .....	71
2.3.3. <i>Аналоговые электронные вольтметры</i> .....	79
2.3.4. <i>Цифровые вольтметры</i> .....	85
2.4. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ .....	90
2.4.1. <i>Общие сведения</i> .....	90
2.4.2. <i>Измерение мощности в диапазонах низких и высоких частот</i> ...	92
2.4.3. <i>Ваттметры на интегральных аналоговых перемножителях</i> ....	94
2.4.4. <i>Измерение мощности в диапазоне СВЧ</i> .....	96
2.5. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПЕДАНСА .....	105
2.5.1. <i>Понятие импеданса</i> .....	105
2.5.2. <i>Мостовые методы измерения импеданса.</i> .....	110
2.5.3. <i>Измерение параметров L, C с помощью автогенератора</i> .....	112
2.5.4. <i>Измерение добротности. Q-метр (куметр)</i> .....	112
2.5.5. <i>Современные анализаторы импеданса</i> .....	114
<b>3. ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ .....</b>	<b>121</b>
3.1. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ.....	121
3.1.1. <i>Блок-схема осциллографа</i> .....	121
3.1.2. <i>Электронно-лучевая трубка</i> .....	122
3.1.3. <i>Принцип получения осциллограмм</i> .....	123
3.1.4. <i>Генератор развертки</i> .....	126
3.1.5. <i>Блок синхронизации</i> .....	129
3.1.6. <i>Усилитель вертикального отклонения</i> .....	130
3.1.7. <i>Входная цепь</i> .....	133
3.1.8. <i>Калибратор</i> .....	133
3.1.9. <i>Погрешности</i> .....	134
3.1.10. <i>Измерение напряжений</i> .....	134
3.2. ЦИФРОВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ .....	136
<b>4. ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА .....</b>	<b>140</b>
4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	140
4.2. ТИПЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ.....	153
4.3. ВАКУУМНАЯ АРМАТУРА, ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ.....	170

4.4. ОБЩИЕ ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ СИСТЕМ И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....	172
4.5. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ .....	176
<b>5. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ТЕХНИКА ИХ ИЗМЕРЕНИЙ .....</b>	<b>189</b>
5.1. СПОСОБЫ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ .....	191
5.2. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СОЛЕНОИДОВ .....	205
5.3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ .....	210
<b>6. ИМПУЛЬСНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ .....</b>	<b>215</b>
6.1. СИСТЕМЫ С КОНДЕНСАТОРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ .....	216
6.2. ИМПУЛЬСНЫЕ СОЛЕНОИДЫ .....	218
6.3. ДИФфуЗИЯ ИМПУЛЬСНОГО ПОЛЯ В ПОЛЫЙ ПРОВОДНИК .....	222
6.4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТОКА .....	225
<b>7. ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....</b>	<b>231</b>
7.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ .....	231
7.2. ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ .....	237
7.3. ОСНОВНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	240
7.4. ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	243
7.5. ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	245
7.5.1. Требования к источникам излучения в эмиссионной спектроскопии.....	245
7.5.2. Требования к источникам излучения в абсорбционной спектроскопии.....	246
7.5.3. Абсолютно черное тело.....	248
7.5.4. Источники теплового излучения.....	249
7.5.5. Газоразрядные источники излучения.....	251
7.6. КОНТУР И УШИРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ.....	257
7.7. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	260
7.7.1. Основные характеристики приемников излучения .....	261
7.7.2. Разновидности приемников излучения .....	263
7.8. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ .....	281
<b>8. СПЕКТРОСКОПИЯ И РАДИОМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....</b>	<b>284</b>
8.1. ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ .....	284
8.2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СПЕКТРОМЕТРОВ.....	293

8.3. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ .....	295
8.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ SI(LI)-ППД .....	300
8.5. СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ .....	304
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>313</b>
<b>ОПИСАНИЕ КУРСА И ПРОГРАММА.....</b>	<b>317</b>

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Курс предназначен для студентов третьего курса бакалавриата, обладающих базовыми знаниями по физике и математике. Курс нацелен на обеспечение базовой подготовки в области физического эксперимента; введение в теорию и методику современного физического эксперимента; изучение теоретических принципов организации и проведения физического эксперимента и метрологии; обучение основным методам математической статистики и их применению при обработке результатов измерений; ознакомление как с классическими, так и современными экспериментальными методами, измерительной техникой и научным лабораторным оборудованием; формирование практических навыков разработки и применения наиболее распространенных измерительных схем с учетом их функциональных особенностей; приобретение студентами знаний для самостоятельной работы при планировании и проведении физического эксперимента в рамках магистерской программы, затрагивающей наиболее динамично развивающиеся направления прикладной физики.

## 1. Общие вопросы измерений

Одним из способов познания человеком окружающего его мира является измерение. Смысл измерения заключается в получении информации о каком-либо предмете или процессе. Такой предмет или процесс называют *объектом измерения*. Применительно к экспериментальной деятельности человека измерение может быть определено следующим образом. *Измерение* – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Эти технические средства принято называть *средствами измерений*. Строго говоря, средствами измерений могут являться и биологические объекты, например человеческий глаз при визуальном наблюдении в физике или тестовые (зондовые) микроорганизмы в микробиологии и медицине. Однако в рамках настоящего курса ограничимся лишь техническими средствами измерений – *измерительными приборами*.

### 1.1. Терминология

Приведем определения основных понятий, используемых в курсе.

***Физическая величина*** - это свойство общее в качественном отношении многим физическим объектам, но в количественном, индивидуальное для каждого из них.

***Единица физической величины*** - это физическая величина, которой по условию присвоено числовое значение, равное единице.

***Измерение физических величин*** - это количественная и качественная оценка физического явления с помощью специальных измерительных средств - средств измерений (СИ).



**Средство измерений** - это техническое средство, имеющее нормированные метрологические характеристики.

К средствам измерений относятся: мера; измерительный прибор; измерительный преобразователь; измерительная система; совокупность измерительных систем.

**Мера** - это средство измерений, воспроизводящее физическую величину заданного размера. Для примера, шкала измерительного прибора с оцифрованными отметками является мерой, если прибор аттестован как средство измерений.

**Измерительный прибор** - это средство измерений, вырабатывающее сигнал измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем (субъектом).

**Измерительный преобразователь** - это средство измерений, вырабатывающее сигнал измерительной информации в форме, удобной для хранения, воспроизведения и передачи по каналам связи, но не доступной для непосредственного восприятия. Например, цифровое преобразование аналоговых сигналов в двоичный код. Это форма сигнала удобна и для хранения и для воспроизведения. При передаче такой информации по каналам связи имеется возможность регенерации искаженных импульсов, что позволяет уменьшить информационные потери и оптимально использовать динамический диапазон системы связи, а также производить различные преобразования, например, автоматизировать процесс сбора и обработки информации и др.

**Измерительная система** - совокупность средств измерений, соединенных между собой каналами передачи информации для выполнения одной или нескольких функций. Примером является система управления и автоматизации технологического процесса.

**Принцип измерений** - это совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

**Метод измерений** - это совокупность приемов и принципов использования технических средств измерений.

**Методика измерений** - это совокупность методов, операций и правил, разработанных специальными метрологическими научно-исследовательскими организациями, утвержденными в законодательном порядке.

**Погрешность измерений** - это различие между истинным и измеренным значениями физической величины.

**Эталон** - это средство измерений, предназначенное для хранения и воспроизведения единицы физической величины, в целях передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, утвержденном в качестве эталона законодательным путем.

**Основная единица измерения** - это единица измерения, имеющая официально утвержденный эталон.

**Производная единица** - это единица измерения, не имеющая эталона, но связанная с основными единицами на основе математических моделей через энергетические соотношения. Например, Вольт (В) - единица измерения разности потенциалов, является производной единицей. С другой стороны: метр; секунда; Ампер (А), являются основными единицами, имеющими официально утвержденные эталоны.

**Дольные и кратные единицы измерения** - это единицы, которые образуются на базе основных и производных, путем умножения на размерный множитель  $10^n$ , где показатель степени  $n = \pm (1, 2, 3, 6, 9, 12, 15, 18)$ . При знаках "+" и "-" образуются, соответственно, кратные и

дольные единицы. Причем, множители разной степени также имеют официально утвержденные названия.

*Первичный эталон* - это средство измерений, обладающее наивысшей в стране точностью.

*Эталон (копия)* - это средство измерений для передачи размеров единиц образцовым средствам.

*Эталон сравнений* - средство для связи эталонов межгосударственных служб.

*Образцовое средство* - это средство измерений, предназначенное только для передачи размеров единиц рабочим средствам измерений.

*Рабочее средство* - средство измерений для оценки физического явления.

*Точность измерений* - числовое значение физической величины, обратное погрешности (наивысшая, высокая, средняя, низкая), определяет классификацию образцовых средств измерений.

## **1.2. Классификация измерений**

### **1.2.1. Качественные и количественные измерения**

Информация, получаемая в результате измерения может быть структурной (информация о структуре или природе объекта измерения) либо метрической (информация о величине, амплитуде или интенсивности определенной характеристики). Структурную информацию получают в результате качественных измерений, метрическую – в результате количественных.

С помощью качественных измерений осуществляют классификацию. При этом все величины, которые должны быть измерены, делятся на группы таким образом, что измеряемая величина попадает только в одну группу. Так, например, с помощью диагностических средств в медицине классифицируют болезнь. Примером качественного измерения в технике является работа всевозможных систем обнаружения. Например, системы пожарной сигнализации внутри зданий. На выходе такой системы есть только два возможных результата: «возгорание есть» и «возгорания нет». Она пользуется температурными датчиками, но не может дать информации о значении или соотношении температур в различных частях здания. Для получения такой информации необходимы количественные измерения.

Переходную ступень между качественными и количественными измерениями занимают *порядковые измерения*. Они основаны на принципе абсолютной значимости сравнения двух величин. При таких измерениях остаются справедливыми соотношения «меньше, чем», «равно» и «больше, чем». Наглядным примером порядкового измерения является оценка знаний студентов. Чем глубже знания, тем выше оценка. Разница между оценками «отлично» и «хорошо» – один балл. Между оценками «удовлетворительно» и «неудовлетворительно» – тоже один балл, однако разница в соответствующих этим оценкам знаниях всегда оказывается различной. К порядковым измерениям также можно отнести взвешивание двух грузов на примитивных некалиброванных рычажных весах.

Количественные измерения могут быть условно разделены на три группы: интервальные, пропорциональные и кардинальные измерения. Для *интервальных измерений* характерно наличие равномерной шкалы с произвольным шагом и плавающим (либо условно выбранным) началом отсчета. Примером интервальных измерений являются измерения температуры с помощью ртутного термометра, проградуированного по шкале Цельсия. *Пропорциональное измерение* обладает теми же

свойствами, только начало отсчета здесь является жестко фиксированным. К таким измерениям можно отнести измерение температуры по абсолютной шкале.

Высшим в этой классификации является *кардинальное измерение*.

С его помощью устанавливают соотношение между значением измеряемой величины и значением эталонной величины, определенной заранее. Понятие эталона физической величины будет рассмотрено позднее. Далее по тексту, если нет специальных оговорок, речь будет идти о кардинальных измерениях.

### 1.2.2. Классификация по способу получения результата

По способу получения результата измерения делят на прямые, косвенные, совместные и совокупные.

*Прямыми* называют измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. К ним, например, относятся измерение напряжения с помощью вольтметра или измерение интервала времени с помощью хронометра.

При *косвенном измерении* искомое значение величины  $Y$  находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , определяемыми прямым измерением:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N). \quad (1.1)$$

Например, к косвенным относится измерение рассеиваемой на резисторе мощности  $P = U^2/R$  по результатам прямых измерений падения напряжения на резисторе  $U$  и его сопротивления  $R$ .

*Совместные измерения* состоят в одновременном измерении нескольких разноименных параметров с целью нахождения зависимости

между ними. Примером совместных измерений может служить получение зависимости сопротивления резистора от его температуры, или получение амплитудно-частотной характеристики радиотехнического фильтра.

При *совокупных измерениях* искомая величина вычисляется на основании системы уравнений, полученной из совокупности нескольких, проводимых последовательно, прямых измерений группы величин. Каждое из уравнений соответствует определенным, всякий раз изменяемым, условиям проведения измерений. К таким измерениям можно отнести измерение внутреннего сопротивления генератора напряжения.

Современные системы сбора и обработки информации позволяют автоматизировать измерительные и вычислительные алгоритмы. Отчетные устройства этих систем выдают в готовом виде значения искомых величин, поэтому формально такие измерения следует отнести к прямым, хотя по сути производимых преобразований они являются косвенными, совместными или совокупными.

### **1.2.3. Статические и динамические измерения**

При *статических измерениях* измеряемая величина остается постоянной (либо меняется незначительно) в процессе измерения. Например, к статическим можно отнести измерения действующего значения гармонического напряжения при постоянной амплитуде.

*Динамическими* называют измерения, в процессе которых измеряемая величина изменяется настолько быстро, что проявляются инерционные свойства средства измерения.

### **1.2.4. Классификация по точности**

По точности измерения делят на три группы. *Измерения максимальной точности*, достижимой на современном уровне развития науки и техники. К ним относят измерения, связанные с созданием и

эксплуатацией эталонов, а также некоторые измерения, проводимые при научных исследованиях. Для таких измерений характерна тщательная оценка погрешностей и их источников.

*Контрольно-поверочные и лабораторные измерения.* К ним относится метрологическая аттестация средств измерений, лабораторный анализ, экспертные измерения. Погрешность таких измерений не должна превышать определенного заранее оговоренного уровня.

*Технические измерения,* при которых погрешность оценивают по метрологическим характеристикам средств измерений с учетом применяемого метода измерений. Технические измерения получили наибольшее распространение.

### **1.3. Физические величины. Единицы измерения**

Настоящий курс нацелен на ознакомление читателя с основными принципами измерения физических величин. *Физической величиной* будем называть свойство, присущее физическому объекту (его состоянию, процессу, протекающему в нем), поддающееся измерению.

Результатом измерения физической величины является численное значение, показывающее как соотносится измеряемая величина с некоторой эталонной мерой. *Эталоном физической величины* называется средство измерений (комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения *единицы физической величины* и передачи ее размера другим средствам измерений. Записывать результат измерения принято в виде:

$$X = \{X\} [X], \quad (1.2)$$

где  $X$  – условное обозначение физической величины,  $\{X\}$  – численное значение физической величины,  $[X]$  – размерность физической величины (единица измерения).

### 1.3.1. Международная система единиц физических величин

Международная система единиц СИ в настоящее время содержит семь основных единиц (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение		Размерность
		русское	международное	
Длина	метр	м	<i>m</i>	<i>L</i>
Масса	килограмм	кг	<i>kg</i>	<i>M</i>
Время	секунда	с	<i>s</i>	<i>T</i>
Сила электрического тока	ампер	А	<i>A</i>	<i>I</i>
Термодинамическая температура	кельвин	К	<i>K</i>	<i>Q</i>
Количество вещества	моль	моль	<i>mol</i>	<i>N</i>
Сила света	кандела	кд	<i>kd</i>	<i>J</i>

Приведем определение и содержание каждой из этих величин:

*единица длины* – метр – длина пути, проходимого светом в вакууме за  $1/299792458$  доли секунды;

*единица массы* – килограмм – масса, равная массе международного прототипа килограмма;

*единица времени* – секунда – продолжительность  $9192631770$  периодов излучения, соответствующего между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133, не возмущенного внешними полями;

*единица силы электрического тока* – ампер – сила постоянного тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения,



расположенным на расстоянии один метр один от другого в вакууме, создавал бы между этими проводниками силу, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины (единицы силы обсуждаются ниже);

*единица термодинамической температуры* – кельвин –  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды, допускается выражение термодинамической температуры в градусах Цельсия;

*единица количества вещества* – моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде углерода-12 массой 0,012 кг;

*единица силы света* – кандела – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого составляет  $1/283$  Вт/ср.

Очевидно, основными единицами не исчерпывается многообразие физических величин. Поэтому помимо основных используются дополнительные и производные единицы.

### **1.3.2. Дополнительные единицы СИ**

Международная система единиц содержит две дополнительные единицы – для измерения плоского и телесного углов:

*единица плоского угла* – радиан (рад, *rad*) – угол между двумя лучами, выходящими из центра окружности и отсекающими дугу, равную по длине радиусу этой окружности, в градусном исчислении  $1 \text{ рад} = 57^{\circ}17'48,8''$ ;

*единица объемного угла* – стерadian (ср, *sr*) – телесный угол, образованный конусом, вершина которого находится в центре сферы, а боковая поверхность отсекает от сферы участок, площадь которого равна квадрату радиуса этой сферы.

### **1.3.3. Производные единицы СИ**

Ниже приведены примеры производных физических величин, наиболее часто встречающихся в технике.

*Сила.* Определяющее уравнение силы:

$$F = m \cdot a, \quad (1.3)$$

где  $m$  – масса тела, кг;  $a$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Единица силы – ньютон (Н,  $N$ ) – сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с<sup>2</sup> в направлении действия силы. Размерность силы:  $LM T^{-2}$ .

*Давление.* Определяющее уравнение для действия силы  $F$ , направленной перпендикулярно поверхности площадью  $S$ :

$$p = F/S, \quad (1.4)$$

где  $p$  – давление в паскалях (Па,  $Pa$ ), если сила выражена в ньютонах, а площадь в квадратных метрах. Размерность давления:  $L^{-1} M T^{-2}$ .

*Работа.* Работа  $A$  по перемещению тела под действием силы  $F$  на расстояние  $l$  в направлении силы определяется как:

$$A = F \cdot l, \quad (1.5)$$

где работа измеряется в джоулях (Дж,  $J$ ), сила в ньютонах, расстояние в метрах. Размерность работы:  $L^2 M T^{-2}$ .

*Энергия* является общей мерой различных видов взаимодействия. Универсальное соотношение, связывающее энергию  $E$  и массу  $m$  дается теорией относительности:

$$W = m \cdot c^2. \quad (1.6)$$

Здесь  $c$  – скорость света в вакууме, м/с. Энергия соразмерна работе.

*Количество электричества (электрический заряд):*

$$Q = I \cdot t. \quad (1.7)$$

Измеряется в кулонах (Кл,  $C$ ). Определяется как заряд, протекающий через поперечное сечение проводника в течение 1 с при силе тока 1 А. Размерность заряда:  $IT$ .

*Электрический потенциал* есть работа по перемещению электрического заряда из точки с нулевым потенциалом в данную точку поля:

$$\varphi = A/Q. \quad (1.8)$$

Измеряется в вольтах (В,  $V$ ). Размерность:  $L^2MT^{-3}\Gamma^1$ . Соразмерная электрическому потенциалу величина – напряжение  $U$ .

*Напряженность электрического поля* численно равна силе, действующей на заряд в данной точке поля:

$$E = F/Q. \quad (1.9)$$

Единица измерения вольт на метр (В/м,  $V/m$ ). Размерность:  $LMT^{-3}\Gamma^1$ .

*Электрическая емкость* равна отношению заряда на поверхности проводника к потенциалу этой поверхности:

$$C = Q/U. \quad (1.10)$$

Измеряется в фарадах (Ф,  $F$ ). Размерность:  $L^{-2}M^{-1}T^4\Gamma^2$ .

*Электрическое сопротивление* определяется законом Ома:

$$R = U/I. \quad (1.11)$$

Соответствует сопротивлению проводника, по которому при приложении к его концам напряжения 1 В протекает ток 1 А. Измеряется в омах (Ом,  $\Omega$ ). Размерность:  $L^2MT^{-3}\Gamma^2$ .

*Магнитный поток* характеризуется количеством вообразимых силовых линий магнитного поля. Единица измерения вебер (Вб,  $Wb$ ). При изменении магнитного потока на 1 Вб в электрической цепи, охваченной этим потоком и имеющей сопротивление 1 Ом, протекает заряд 1 Кл:

$$\Phi = Q \cdot R. \quad (1.12)$$

Размерность:  $L^2MT^{-2}\Gamma^1$ .

*Магнитная индукция* определяет плотность магнитных силовых линий и численно равна магнитному потоку через единичную площадь:

$$B = \Phi/S. \quad (1.13)$$

Измеряется в теслах (Тл,  $T$ ). Размерность:  $MT^{-2}\Gamma^1$ .

*Напряженность магнитного поля* определяется для поля кольцевого тока как:

$$H = I/d, \quad (1.14)$$

где  $d$  – диаметр кольца, м.

Единица измерения ампер на метр (А/м,  $A/m$ ). Размерность:  $L^{-1}I$ .

*Индуктивность* численно равна отношению магнитного потока, возбуждаемого кольцевым током к величине этого тока:

$$L = \Phi/I. \quad (1.15)$$

Единица измерения генри (Гн,  $H$ ). Размерность:  $L^2MT^{-2}I^{-2}$ .

*Активная мощность электрической цепи* определяется работой электрического тока в единицу времени. Для постоянного тока:

$$P = I \cdot U. \quad (1.16)$$

Измеряется в ваттах (Вт,  $W$ ). Размерность:  $L^2MT^{-3}$ .

*Частота*. Вводится для периодических процессов. Обрато пропорциональна периоду:

$$f = 1/T. \quad (1.17)$$

Единица измерения герц (Гц,  $Hz$ ). Размерность:  $T^{-1}$ .

#### 1.3.4. Кратные и дольные единицы

Приставки, принятые для обозначения десятичных кратных и дольных единиц приведены в табл. 1.2.

Например, в радиоэлектронике широко применяются такие кратные и дольные единицы:

частота –  $10^3$  Гц = 1 кГц,  $10^7$  Гц = 10 МГц,  $10^8$  Гц = 0,1 ГГц;

емкость –  $10^{-9}$  Ф = 1 нФ,  $10^{-11}$  Ф = 10 пФ и т.д.

При проведении абсолютных измерений, основанных на прямых измерениях одной или нескольких основных величин, значение измеряемой величины определяется в единицах СИ. Результат относительных измерений, выполняемых путем отношения одноименных

Таблица 1.2

Единицы	Наименование приставки	Множитель	Обозначение	
			русское	международное
Кратные	экса	$10^{18}$	Э	E
	пета	$10^{15}$	П	P
	тера	$10^{12}$	Т	T
	гига	$10^9$	Г	G
	мега	$10^6$	М	M
	кило	$10^3$	к	k
	гекто	$10^2$	г	h
	дека	$10^1$	да	da
Дольные	деци	$10^{-1}$	д	d
	санти	$10^{-2}$	с	s
	милли	$10^{-3}$	м	m
	микро	$10^{-6}$	мк	$\mu$
	нано	$10^{-9}$	н	n
	пико	$10^{-12}$	п	p
	фемто	$10^{-15}$	ф	f
	атто	$10^{-18}$	а	a

величин, выражается во внесистемных единицах (например, вольт-ампер) или является безразмерным значением (например, значение коэффициента мощности). В радиотехнической практике результат относительных измерений обычно выражается в децибелах, а при измерениях в технике связи дополнительно используется еще одна внесистемная единица - непер.

**Децибел (дБ)** - относительная единица, основанная на десятичном логарифме отношения двух величин одинаковой размерности (мощность, напряжение, ток)

$$N_{\text{дб}} = 10 \lg(P_2/P_1), N_{\text{дб}} = 20 \lg(U_2/U_1) = 20 \lg(I_2/I_1). \quad (1.18)$$

**Непер (неп.)** - относительная единица, основанная на натуральном логарифме отношения двух величин одинаковой размерности:

$$N_{\text{неп.}} = \ln(U_2/U_1). \quad (1.19)$$

Соотношение между относительными единицами определяется следующим образом  $1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ неп.}$ ,  $1 \text{ неп.} = 8,686 \text{ дБ}$ .

#### 1.4. Ошибки измерений

Любое сколь угодно тщательное измерение в принципе не может дать истинного значения измеряемой величины. Это связано с наличием погрешности. Можно выделить три основных источника погрешностей: методика измерений, измерительная аппаратура и оператор, производящий считывание результата. В случае автоматизированных измерений оператор отсутствует.

Приведем краткую классификацию погрешностей.

##### 1.4.1. Абсолютная и относительная погрешности

В результате измерения может быть получено лишь приближенное значение  $x$ , которое отличается от истинного значения  $X$  на некоторую величину  $\Delta x$ . Величина  $\Delta x$  называется *абсолютной погрешностью* измерения. Истинное значение  $X$  неизвестно, поэтому принято говорить об оценке погрешности измерения, а не о ее точном вычислении. При этом истинное значение заменяется действительным  $X_d$ , которое вычисляют как среднее от большого числа измерений, либо по другому заранее оговоренному алгоритму:

$$\Delta x = x - X \approx x - X_d. \quad (1.20)$$

Погрешности измерения иногда удобно характеризовать их относительными значениями. Относительная погрешность измерения – это отношение абсолютной погрешности к истинному (действительному) значению измеряемой величины. В большинстве практически важных случаев значения  $x$  и  $X_d$  оказываются близкими, поэтому относительную

погрешность вычисляют как отношение абсолютной погрешности к измеренному значению:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{X} \approx \frac{\Delta x}{X_0} \approx \frac{\Delta x}{x}. \quad (1.21)$$

#### 1.4.2. Систематические и случайные погрешности

Разделение погрешностей на систематические и случайные обусловлено разным характером их проявления при многократных измерениях одной и той же физической величины. В общем случае погрешность описывается нестационарным случайным процессом (рис. 1.1).

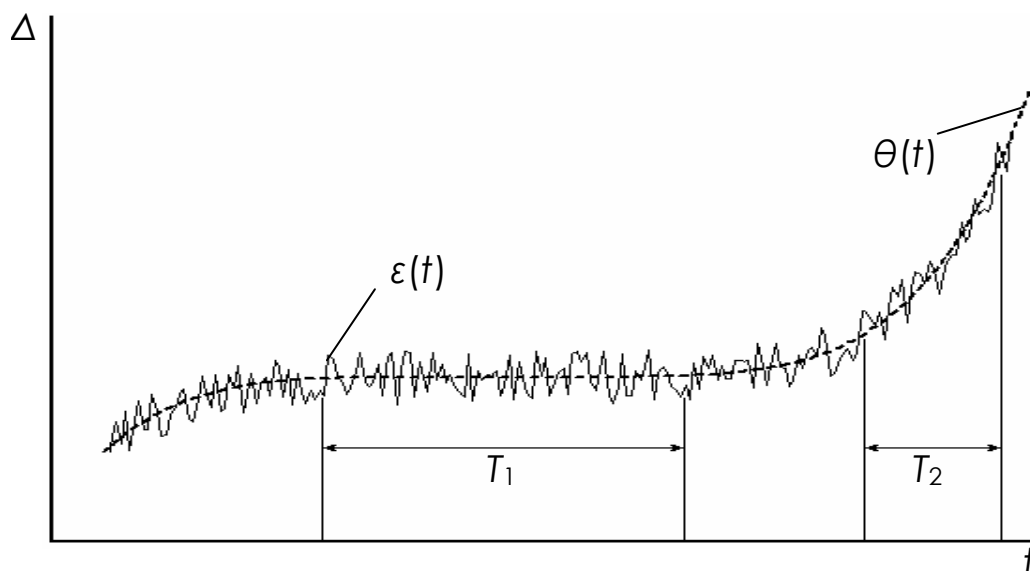


Рис. 1.1. Иллюстрация случайной погрешности

Представленная зависимость  $\Delta(t)$  характеризуется быстро изменяющимися флуктуациями погрешности  $\varepsilon(t)$  относительно медленно изменяющегося среднего значения  $\theta(t)$ , показанного на рисунке пунктирной линией:

$$\Delta = \theta(t) + \varepsilon(t). \quad (1.22)$$

Согласно определению, *систематические погрешности* — это составляющие погрешности измерений, которые при многократных

измерениях остаются постоянными или изменяются по вполне определенному закону.

Отсюда следует, что представленная на рис. 1.1 зависимость  $\theta(t)$  характеризует систематическую погрешность. При этом на интервале  $T_1$  систематическую погрешность можно считать постоянной, а на интервале  $T_2$  необходимо учитывать ее изменение в течение времени измерения. Обычно эта составляющая погрешности изменяется со временем относительно медленно. Иногда систематические погрешности можно предсказать, рассчитать или даже измерить, а затем учесть, введя поправку в окончательный результат измерения.

*Случайные погрешности* – это составляющие погрешности, изменяющиеся случайным образом при многократных измерениях одной и той же физической величины. Быстрые флуктуации  $\varepsilon(t)$  на рис. 1.1 характеризуют случайную погрешность.

Случайные погрешности определяются совместным действием причин, имеющих случайный характер: собственными шумами элементов электронных схем, наводками на входные цепи средства измерений, пульсацией постоянного питающего напряжения и т.д. При большом количестве измерений случайные погрешности могут быть определены при помощи теории вероятности и математической статистики.

Необходимо отметить еще два вида погрешностей, возникающих случайно – это грубые погрешности и промахи. *Грубой* называется погрешность, существенно превышающая ожидаемое значение погрешности. Такие погрешности могут быть вызваны, например, скачком питающего напряжения при включении в сеть мощных потребителей энергии. Грубые погрешности исключаются из дальнейшего рассмотрения. *Промахи* обусловлены неправильными действиями оператора, например, описками при считывании показаний. Промахи обнаруживают нестатистическими методами и исключают из массива показаний.



### **1.4.3. Методические, инструментальные и субъективные погрешности**

*Методические погрешности  $\Delta_m$*  – это погрешности, связанные с методом измерения, его несовершенством или упрощениями, допущенными при измерениях, в том числе приближенность формул, положенных в основу метода. Во многих случаях погрешность метода измерения поддается теоретическому расчету.

К методическим погрешностям относят также составляющие погрешности, вызванные влиянием средства измерений на объект измерений, например, влияние входного сопротивления вольтметра при измерении напряжения на резисторе. Одной из причин возникновения методической погрешности может стать неправильный выбор средства измерений.

*Инструментальные погрешности  $\Delta_{ин}$*  обусловлены несовершенством средств измерений. Причинами возникновения инструментальной погрешности являются неточности, допущенные при изготовлении и регулировке измерительного прибора; несовершенство его конструкции и технологии изготовления; изменение параметров элементов конструкции и схемы вследствие старения узлов и деталей; а также влияние на средство измерения внешних факторов (климатических, механических, электрических и т.д.).

Субъективные погрешности связаны с индивидуальными особенностями оператора, производящего измерения. Так, субъективная погрешность от параллакса возникает при считывании по шкале аналогового прибора, если стрелку, расположенную на некотором расстоянии от шкалы, визировать не перпендикулярно поверхности шкалы. Иногда субъективная погрешность возникает при считывании показаний измерителя до их окончательного установления.

При разработке автоматических измерительных систем субъективная погрешность практически сводится к нулю, поэтому общая погрешность измерений определяется как:

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_n. \quad (1.23)$$

#### 1.4.4. Аддитивные и мультипликативные погрешности

Для большинства измерительных систем погрешность измерения зависит от измеряемой величины  $x$ :

$$\Delta = a + b \cdot x. \quad (1.24)$$

В наиболее общем случае зависимость  $\Delta(x)$  может быть нелинейной, однако в подавляющем большинстве практически важных случаев соотношение (1.21) выполняется с достаточной точностью. При этом аддитивная составляющая  $a$  не зависит от измеряемой величины и вызвана, как правило, дрейфом параметров элементов измерительного прибора, наводками, вибрациями и трением. Мультипликативная составляющая погрешности характеризуется коэффициентом  $b$ . Ее источниками являются отклонения условий проведения измерений от нормальных (температура, влажность и т.д.).

#### 1.4.5. Статические и динамические погрешности

В зависимости от скорости изменения измеряемой величины различают статические и динамические погрешности. *Статическая погрешность* имеет место при измерении постоянной во времени или относительно медленно изменяющейся величины. Если измеряемая величина изменяется во времени настолько быстро, что сказывается инерционность измерительного прибора, режим измерения называется динамическим. *Динамическая погрешность* определяется как разность между погрешностью в динамическом режиме и статической погрешностью.

## 1.5. Оценка систематических погрешностей

По определению систематические погрешности с течением времени либо остаются постоянными, либо изменяются по вполне определенному закону. В качестве примера постоянной систематической погрешности можно привести методическую погрешность, связанную с использованием приближенных соотношений, положенных в основу измерительного прибора или применяемых при косвенных измерениях. Постоянной систематической погрешностью может являться и инструментальная погрешность, вызванная неточностью регулировки и настройки измерительного прибора при его выпуске или поверке.

Систематические погрешности, изменяющиеся во времени вызваны как правило, предсказуемым влиянием внешних факторов (например, изменение питающего напряжения при изменении нагрузки).

При наличии  $N$  источников систематических погрешностей  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$  суммарная систематическая погрешность определяется как:

$$\theta = \sum_{i=1}^N \theta_i. \quad (1.25)$$

Анализ причин возникновения той или иной составляющей систематической погрешности позволяет установить приближенные математические модели, пригодные для оценки систематической погрешности. Наиболее распространенные в технике математические модели систематических погрешностей: постоянная величина (инструментальная погрешность, влияние средства измерений на объект измерений); линейная модель (влияние климатических условий, уровень вибрации, изменение питающего напряжения); затухающая экспоненциальная функция (вход в тепловой режим компонентов электронных схем, перезарядка рабочих и паразитных емкостей).

Систематические погрешности являются в общем случае функцией измеряемой величины, влияющих величин (температуры, влажности,

напряжения питания и пр.) и времени. В функции измеряемой величины систематические погрешности находят при поверке и аттестации образцовых приборов, например, измерением наперед заданных значений измеряемой величины в нескольких точках шкалы. В результате строится кривая или создается таблица погрешностей, которая используется для определения поправок. Поправка в каждой точке шкалы численно равна систематической погрешности и обратна ей по знаку, поэтому при определении действительного значения измеряемой величины поправку следует прибавить к показанию прибора. Так, если поправка к показанию динамометра 120 Н равна +0,6 Н, то действительное значение измеряемой силы составляет  $120+0,6=120,6$  Н. Удобнее пользоваться поправкой, чем систематической погрешностью, поэтому приборы чаще снабжают кривыми или таблицами поправок.

Систематическую погрешность в функции измеряемой величины можно представить в виде суммы погрешности схемы, определяемой самой структурной схемой средства измерений, и технологических погрешностей, обусловленных погрешностями изготовления его элементов.

Как те, так и другие виды погрешностей можно рассматривать в качестве систематических лишь при измерении постоянной величины с помощью одного экземпляра измерительного прибора. В массе же измерений различных значений физической величины, осуществляемых одним или многими приборами того же типоразмера, эти систематические погрешности приходится относить к классу случайных.

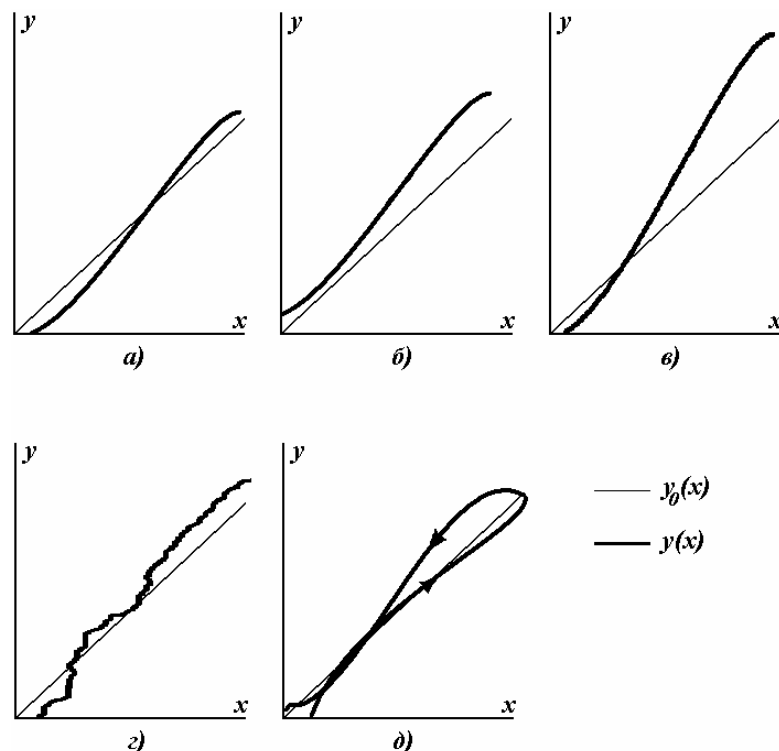


Рис. 1.2. Сравнение статической и реальных характеристик средства измерения

Между погрешностями схемы и технологическими погрешностями средств измерений существует принципиальная разница. Если первые накладывают свой отпечаток на характер изменения по шкале суммарной погрешности всех средств измерений данного типоразмера, то технологические погрешности индивидуальны для каждого экземпляра, т. е. их значения в одних и тех же точках шкалы различны для различных экземпляров приборов. На рис. 1.2, а показано взаимное положение статических характеристик реального  $y(x)$  и идеального  $y_0(x)$  приборов при наличии только погрешностей схемы. Технологические погрешности в большой степени искажают эту картину.

Результатом их проявления является:

а) поступательное смещение статической характеристики относительно характеристики идеального прибора и возникновение

погрешности, постоянной в каждой точке шкалы; эта погрешность называется *аддитивной* (рис. 1.2, б);

б) поворот статической характеристики и появление погрешности, линейно возрастающей или убывающей с ростом измеряемой величины и называемой *мультипликативной погрешностью* (рис. 1.2, в);

в) нелинейные искажения статической характеристики (рис. 1.2, з);

г) появление погрешности обратного хода, выражающейся в несовпадении статических характеристик прибора при увеличении и уменьшении измеряемой величины (рис. 1.2, д).

Динамические погрешности обуславливаются инерционными свойствами средств измерений и появляются при измерении переменных во времени величин. Типичным случаем является измерение с регистрацией сигнала, изменяющегося со временем. Если  $x(t)$  и  $y(t)$  – сигналы на входе и на выходе средства измерений с чувствительностью  $K$ , то динамическая погрешность

$$\zeta_o(t) = \frac{y(t)}{K} - x(t) \quad (1.26)$$

Для средств измерений, являющихся линейными динамическими системами с постоянными во времени параметрами, наиболее общая характеристика динамических свойств – это *дифференциальное уравнение*. В этом случае уравнение линейное с постоянными коэффициентами

$$\sum_{i=1}^n a_i y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^m b_j x^{(j)}(t), \quad (1.27)$$

где  $y^{(i)}(t)$  и  $x^{(j)}(t)$  –  $i$ -е и  $j$ -е производные входного и выходного сигналов;  $a_i$  и  $b_j$  – постоянные коэффициенты,  $n$  и  $m$  – порядок левой и правой частей уравнения, причем  $n < m$ .

Дифференциальное уравнение является метрологической характеристикой средств измерения, поскольку позволяет при известном

сигнале на входе  $x(t)$  найти выходной сигнал  $y(t)$  и после подстановки их в выражение (1.27) вычислить динамическую погрешность.

Для нормирования динамических свойств средств измерения часто указывают на дифференциальное уравнение, а другие, производные от него динамические характеристики, находятся экспериментальным путем. Сюда относятся передаточная функция, амплитудная и фазовая частотные характеристики, переходная и импульсная переходная функции.

При восприятии измеряемой величины или измерительного сигнала средство измерений оказывает некоторое воздействие на объект измерения или на источник сигнала. Результатом этого воздействия может быть некоторое изменение измеряемой величины относительно того значения, которое имело место при отсутствии средства измерений. Такое обратное воздействие средства измерений на объект измерений особенно четко просматривается при измерении электрических величин. Так, ЭДС нормального элемента определяется как напряжение на его зажимах в режиме холостого хода. При измерении этого напряжения вольтметром с некоторым конечным входным сопротивлением результат измерения будет зависеть от соотношения между внутренним сопротивлением нормального элемента (его выходное сопротивление) и входным сопротивлением вольтметра. Для оценки возникающей при этом погрешности необходимо знать значения этих сопротивлений, поэтому их следует рассматривать как метрологические характеристики.

## **1.6. Обработка экспериментальных данных**

Экспериментальные исследования, выполняемые в науке и технике, включают в себя как измерительную часть, так и обработку полученных данных с их детальным анализом. Практические знания из области проведения и организации эксперимента, умения и навыки в работе с измерительными приборами, владение аппаратом статистического анализа

результатов требуются и в деятельности инженера-практика, и в деятельности инженера-исследователя. В этом разделе рассмотрены вопросы, связанные с составлением таблиц и построением графиков – всем тем, что требуется на начальном этапе обработки данных измерений.

### **1.6.1. Таблицы**

Для записи результатов большого количества однотипных измерений удобно использовать таблицы. С их помощью удастся избежать ненужной многократной записи обозначения измеряемой величины, единиц измерения, используемых множителей и т.п. В таблицы, помимо экспериментальных данных, могут быть сведены промежуточные результаты обработки этих данных. Вот основные правила, которыми следует руководствоваться при построении таблиц.

Форма таблицы должна быть удобна для записи и дальнейшей обработки экспериментальных данных. С этой целью необходимо предварительно продумать, значения каких физических величин или результаты расчетов будут помещены в таблицу. Отсюда заранее определяют количество столбцов и строк, необходимых в таблице. После этого столбцы и строки вычерчивают карандашом по линейке, формируя графический контур таблицы.

Таблицы, а их может потребоваться несколько, принято нумеровать в порядке их использования. Кроме того, каждой таблице дают краткое название, соответствующее помещенным в нее данным.

Первый столбец таблицы, как правило, отводят для записи порядкового номера измерения. В заголовках других столбцов, т.е. в самой верхней части, после символьного обозначения физической величины через запятую приводят единицы ее измерения, причем все единицы измерения принято указывать в русском написании и только в системе СИ.



Общий десятичный множитель, если он присутствует во всех результатах измерений, помещаемых в данный столбец, выносят в заголовок. Во избежание недоразумений при последующем использовании таблицы, общий множитель записывают перед единицами измерения физической величины.

Таблица 1.3 иллюстрирует указанные правила. В ней приведены результаты косвенных измерений удельного сопротивления  $\rho$  платины при разных температурах. Таблица содержит результаты однократных прямых измерений силы тока  $I$  через образец, падения напряжения  $V$  на нем и термоэлектродвижущей силы  $U_T$  термопары, служащей датчиком температуры  $T$ .

Таблица 1.3.

Номер измерения	$I$ , мА	$V$ , мВ	$U_T$ , мВ	$T$ , К	$\rho$ , $10^{-8}$ Ом·м
1	1,0	2,78	0	293	1,02
2	1,0	2,83	0,20	298	1,04
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...

### 1.6.2. Графики

Более наглядными, чем таблицы, являются графики зависимостей исследуемых физических величин. Графики дают визуальное представление о связи между величинами, что крайне важно при интерпретации полученных данных, так как графическая информация легче воспринимается, вызывает больше доверия, обладает значительной емкостью. На основе графика удобнее сделать вывод о соответствии теоретических представлений данным эксперимента. Ниже изложены рекомендации по построению графиков.

### **Выбор бумаги**

Графики строят только на бумаге, имеющей координатную сетку. Это может быть обычная миллиметровка с линейным масштабом по осям или логарифмическая бумага. Логарифмическую бумагу используют реже, поэтому отметим, что она бывает двух типов. У бумаги первого типа по одной оси масштаб линейный, по другой – логарифмический, так называемый полулогарифмический масштаб. Бумага второго типа имеет логарифмический масштаб по обеим осям.

### **Распределение осей**

Графики, за редким исключением, строят в прямоугольной системе координат, где по горизонтальной оси (оси абсцисс) откладывают аргумент, независимую физическую величину, а по вертикальной оси (оси ординат) – функцию, зависимую физическую величину.

### **Выбор масштабов**

Обычно график строят на основании таблицы экспериментальных данных, откуда легко установить интервалы, в которых изменяются аргумент и функция. Их наименьшее и наибольшее значения задают значения масштабов, откладываемых вдоль осей. Не следует стремиться поместить на осях точку (0,0), используемую как начало отсчета на математических графиках. Для экспериментальных графиков масштабы по обеим осям выбирают независимо друг от друга и, как правило, соотносят с погрешностью измерения аргумента и функции: желательно, чтобы цена наименьшего деления каждой шкалы примерно равнялась соответствующей погрешности.

Масштабная шкала должна легко читаться, а для этого необходимо выбрать удобную для восприятия цену деления шкалы: одной клетке должно соответствовать кратное 10 количество единиц откладываемой физической величины:  $10^n$ ,  $2 \cdot 10^n$  или  $5 \cdot 10^n$ , где  $n$  – любое целое число,

положительное или отрицательное. Так, числа 2; 0,5; 100; 0,02 – подходят, а числа 3; 7; 0,15 – не подходят для этой цели.

При необходимости масштаб по одной и той же оси для положительных и отрицательных значений откладываемой величины может быть выбран разным, но только в том случае, если эти значения отличаются не менее чем на порядок, т.е. в 10 раз и более. Примером может служить вольт-амперная характеристика диода, когда прямой и обратный токи отличаются не менее, чем в тысячу раз: прямой ток составляет миллиамперы, обратный – микроамперы.

### **Нанесение шкал**

Стрелки, задающие положительное направление, на координатных осях обычно не указывают, если выбрано принятое положительное направление осей: снизу – вверх и слева – направо. Оси подписывают: ось абсцисс – справа внизу, ось ординат – слева вверху. Против каждой оси указывают название или символ откладываемой по оси величины, а через запятую – единицы ее измерения, причем все единицы измерения приводят в русском написании в системе СИ. Числовой масштаб выбирают в виде равноотстоящих по значению «круглых чисел», например: 2; 4; 6; 8 ... или 1,82; 1,84; 1,86 ... Десятичный множитель масштаба, как в таблицах, относится к единицам измерения, например, вместо 1000; 2000; 3000 ... получится 1; 2; 3 ... с общим множителем  $10^3$ , указанным перед единицей измерения. Допускается использование приставок, принятых для обозначения десятичных кратных и дольных единиц (см. табл. 1.2).

### **Масштабные риски**

Риски проставляют по осям на одинаковом расстоянии друг от друга, чтобы они выходили на поле графика. По оси абсцисс цифры числового масштаба пишут под рисками, по оси ординат – слева от рисок.

## Нанесение точек

Экспериментальные точки аккуратно наносят на поле графика карандашом. Их всегда проставляют так, чтобы они были отчетливо различимы. Если в одних осях строят различные зависимости, полученные, например, при измененных условиях эксперимента или на разных этапах работы, то точки таких зависимостей должны отличаться друг от друга. Их следует отмечать разными значками (квадратами, кружками, крестиками и т.п.) или наносить карандашами разного цвета.

Расчетные точки, полученные путем вычислений, размещают на поле графика равномерно. В отличие от экспериментальных, они должны слиться с теоретической кривой после ее построения. Расчетные точки, как и экспериментальные, наносят карандашом для удобства редактирования в случае ошибки.

Выносные координатные линии при нанесении точек не используют, так как для этих целей существует сетка миллиметровки, а лишние линии засоряют график, делая его неудобным для восприятия и работы с ним.

На рис. 1.3 приведена полученная по точкам экспериментальная зависимость, которая построена на бумаге, имеющей координатную сетку.

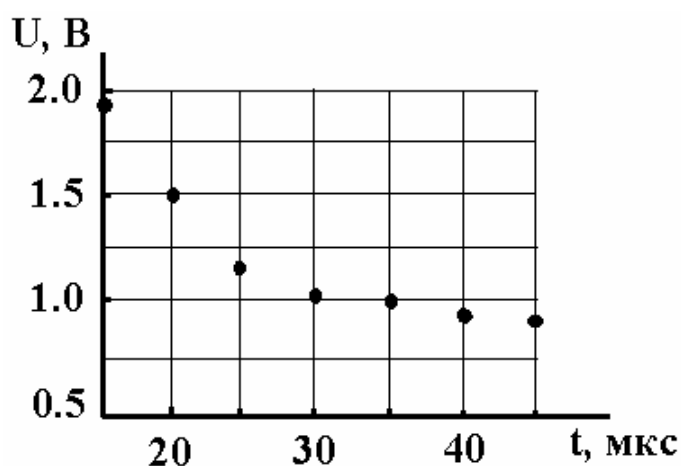


Рис. 1.3. Зависимость напряжения на конденсаторе от времени

## **Проведение кривых**

Экспериментальные точки с помощью карандаша соединяют плавной кривой, чтобы они в среднем были одинаково расположены по обе стороны от проведенной кривой. Если известно математическое описание наблюдаемой зависимости, то теоретическая кривая проводится точно так же. Нет смысла стремиться провести кривую через каждую экспериментальную точку, так как кривая является лишь интерпретацией результатов измерений, известных из эксперимента и определенных с некоторой погрешностью. По сути, есть только экспериментальные точки, а кривая – произвольное, не обязательно верное, домысливание эксперимента. Представим, что все экспериментальные точки соединены отрезками прямых и на графике получилась ломаная линия. Такая экспериментальная кривая не имеет ничего общего с истинной физической зависимостью. Это следует из того, что форма полученной линии не будет воспроизводиться при повторных сериях измерений.

Напротив, теоретическую зависимость строят на графике таким образом, чтобы она плавно проходила по всем расчетным точкам. Это требование очевидно, так как теоретические значения координат точек могут быть вычислены сколь угодно точно.

Правильно построенная кривая должна заполнять все поле графика, что будет свидетельством правильного выбора масштабов по каждой из осей. Если же значительная часть поля оказывается незаполненной, то необходимо заново выбрать масштабы и перестроить зависимость.

## **Отображение погрешностей измерений на графике**

Результаты измерений, на основании которых строят экспериментальные зависимости, содержат погрешности. Чтобы указать их значения на графике, используют два основных способа.

Первый упоминался при обсуждении вопроса выбора масштабов. Он состоит в выборе цены деления масштабной шкалы графика, которая должна равняться погрешности откладываемой по данной оси величины.

В таком случае точность измерений не требует дополнительных пояснений.

Если достичь соответствия погрешности и цены деления не удастся, используют второй способ, заключающийся в прямом отображении погрешностей на поле графика. А именно, вокруг проставленной экспериментальной точки строят два отрезка, параллельные осям абсцисс и ординат. В выбранном масштабе длина каждого отрезка должна равняться удвоенной погрешности величины, откладываемой по параллельной оси. Центр отрезка должен приходиться на экспериментальную точку. Вокруг точки образуются как бы «усы», задающие область возможных значений измеряемой величины. Погрешности становятся зримыми, хотя «усы» могут невольно засорить поле графика. Отметим, что указанный способ чаще всего применяют тогда, когда погрешности меняются от измерения к измерению. Иллюстрацией этого служит рис. 1.4.

График нумеруют, ему дают название, кратко отражающее содержание построенной зависимости. Все графические символы, использованные при построении, поясняют в подписи к графику, которую располагают под графиком или на не занятой кривой части поля.

Правила оформления графиков в учебниках, научных публикациях, монографиях несколько отличаются от изложенных выше, что в первую очередь связано с их иллюстративным характером. Большинство таких графиков имеют смысл рисунков, так как на них часто не приводят масштабную сетку и масштабы по осям, не обозначают единицы

измерения откладываемых величин. Отчасти все это объясняется малыми размерами самих графиков, на которых просто не остается места для дополнительных надписей и линий.

### Работа с графиками

На основе графического представления исследуемых зависимостей во многих случаях удается провести достаточно полную обработку экспериментальных данных. Подобная обработка всегда проста и наглядна, не требует сложных вычислений, взамен же дает вполне приемлемые по точности результаты. Полезно взять за правило начинать обработку любых данных с графических построений и их интерпретации. Впоследствии можно воспользоваться более точными методами статистической обработки, но никакие математические ухищрения не составят конкуренции зримой достоверности графиков.

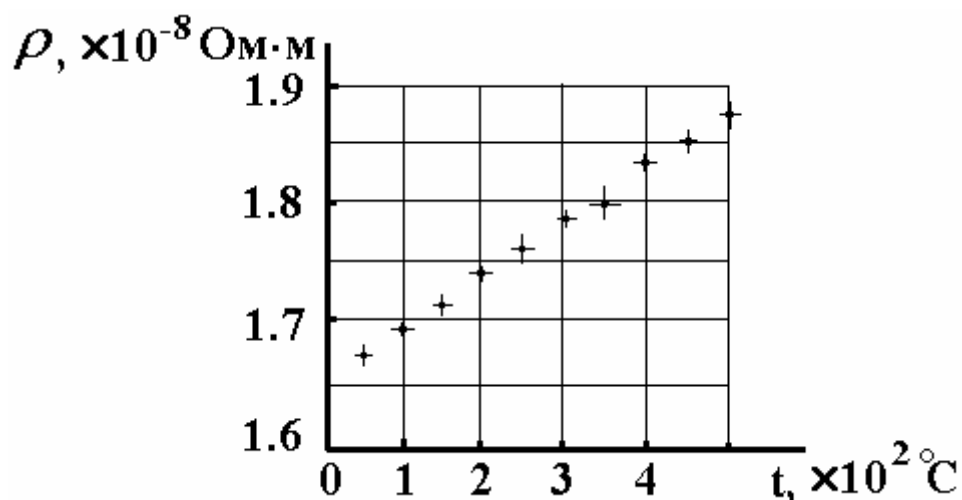


Рис. 1.4. Зависимость удельного электрического сопротивления меди от температуры

### Считывание точек с графика

Часто возникает необходимость найти из имеющегося графика значение функции  $y$ , если задано значение аргумента  $x$ . Такое считывание

точек требуется, например, при использовании градуировочных графиков термопар, расходомеров и тому подобного, которые, в свою очередь, строят на основании предварительных измерений или берут из справочников.

Во всех этих случаях координата точки, определяемая из графика, имеет погрешность, сопоставимую с ценой наименьшего масштабного деления.

### Экстремум кривой

При дискретных измерениях физической величины, т.е. измерениях при некоторых фиксированных значениях аргумента, исследуемая зависимость не может быть восстановлена полностью. Поэтому особенности кривой, проведенной по экспериментальным точкам, не могут быть выявлены абсолютно точно. Это в первую очередь относится к определению координат экстремумов – максимумов и минимумов кривых. Например, на рис. 1.5 кривая может иметь форму, отмеченную как сплошной, так и штриховыми линиями. Однако график дает основание утверждать, что максимум находится на отрезке  $(x_1, x_3)$ ,

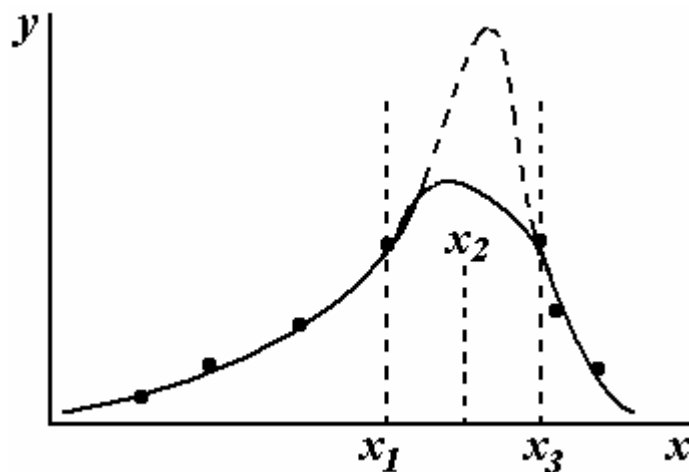


Рис. 1.5. К определению положения экстремума на экспериментальной кривой



поэтому его координату можно оценить как

$$x_{\max} = \frac{(x_1 + x_3)}{2}, \quad (1.28)$$

а за оценку погрешности принять величину

$$\Delta x = \frac{(x_3 - x_1)}{2}, \quad (1.29)$$

Чтобы уменьшить погрешность экспериментального определения координаты экстремума, в близкой к нему области следует выполнять измерения как можно чаще с минимально допустимым шагом изменения величины  $x$ . Если оценка (1.29) оказывается меньше погрешности измерения величины  $x$ , то именно погрешность измерения следует принимать за погрешность  $\Delta x$ .

### **Проверка теоретических выводов**

Графическую проверку осуществляют на основе сравнения экспериментальной и теоретической кривых, совместно построенных на одном графике. Для корректности сравнения необходимо учитывать разброс точек экспериментальной кривой. С этой целью на графике по обе стороны от нее проводят дополнительные кривые, симметричные относительно экспериментальной кривой. Выполняя построение дополнительных кривых, необходимо исходить из того, что между ними должна оказаться примерно половина всех экспериментальных точек. Теоретическая кривая, если она соответствует полученным данным, также должна располагаться в промежутке между дополнительными кривыми.

### **Графическое дифференцирование**

Графическое дифференцирование может понадобиться, например, при вычислении дифференциального сопротивления диода. Вольт-амперная характеристика диода нелинейна, поэтому его сопротивление зависит от приложенного напряжения, называемого смещением. Понятие

статического сопротивления (сопротивления по постоянному току  $R = U/I$ ) в данном случае лишено физического смысла, поэтому вводят дифференциальное сопротивление, при заданном смещении находимое путем дифференцирования экспериментальной вольт-амперной характеристики.

Поясним, как графически выполнить дифференцирование. Известно, что производная от функции  $y(x)$  равна угловому коэффициенту касательной, построенной к кривой  $y(x)$  при том же значении аргумента, при котором вычисляется  $\frac{dy}{dx}$ . Поэтому после графического отображения экспериментальной кривой для вычисления производной в некоторой точке достаточно провести на графике касательную к кривой в той же точке и вычислить ее угловой коэффициент. Конечно, метод весьма чувствителен к точности построения кривой – даже небольшая неточность, допущенная при вычерчивании, может привести к ощутимым ошибкам в производной. Это означает, что экспериментальную кривую следует строить очень тщательно.

### **Графическое интегрирование**

Определенный интеграл  $\int_{x_1}^{x_2} y dx$  от неотрицательной функции  $y(x)$  может быть найден как площадь плоской геометрической фигуры, ограниченной на графике прямой  $x = x_1$  слева, прямой  $x = x_2$  справа, кривой  $y(x)$  сверху и прямой  $y = 0$  снизу. Такая интерпретация является удобной применительно к вычислению интеграла от любой экспериментально полученной зависимости. Площадь фигуры, дающая количественное значение интеграла, находят посредством подсчета составляющих ее клеток миллиметровки с последующим домножением результата подсчета на цену стороны клетки по каждой из двух осей.

Графическое интегрирование можно использовать, например, при проверке закона излучения Стефана-Больцмана, устанавливающего, что интегральная светимость физического тела пропорциональна четвертой степени его температуры. Светимость находят интегрированием экспериментальной кривой, отображающей зависимость спектральной плотности излучения тела от длины волны.

Графические дифференцирование и интегрирование дают неплохие по точности результаты, однако основная область их применения относится к качественному анализу исследуемых зависимостей.

### **1.6.3. Гистограммы**

Часто в экспериментальной работе необходимо проводить многократные измерения физической величины при неизменных условиях эксперимента. Когда мы говорим о неизменных условиях эксперимента, то имеется в виду, что фиксируемые параметры объекта и измерительной системы не претерпевают заметных отклонений. Однако значительное число не учитываемых факторов, оказывающих влияние на систему и объект измерений, приводят к разбросу экспериментальных значений и появлению погрешностей, обсуждавшихся выше. Для нивелирования этих погрешностей измерения проводят многократно.

Например, при проведении десяти ( $N = 10$ ) опытов с тонкой собирающей линзой получены значения (Табл. 1.4) расстояния  $L$  между плоскостями линзы и изображения.

При такой форме записи эти десять чисел передают информацию в неудобной форме. Если предположить, что необходимо провести значительно большее число измерений, то таблица вообще перестанет быть читаемой.

Первым шагом в систематизации полученных данных может быть

сортировка этого ряда, например по возрастанию: 126, 127, 127, 127, 128,

Таблица 1.4

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L$ , мм	127	126	128	127	129	128	127	130	129	128

128, 128, 129, 129, 130. Затем, вместо того чтобы писать три раза подряд «127, 127, 127», можно указать, что значение  $L=127$  мм было получено три раза, и так для каждого из полученных значений. Эти данные можно свести в более удобочитаемую таблицу (Табл. 1.5).

Таблица 1.5

Полученные значения $L$ , мм	126	127	128	129	130
Кол-во реализаций	1	3	3	2	1

Графически данные табл. 1.5 можно отобразить еще более наглядно, если построить зависимость количества  $n$  реализаций величины  $L$  от самой этой величины (рис. 1.6).

Чаще вместо величины количества реализаций  $n$  вводят отношение  $n/N$ , называемое весовым множителем, который показывает какова доля реализации каждого из значений  $L$  в полном объеме результатов измерений.

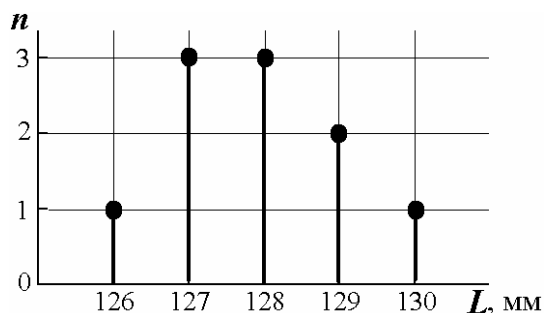


Рис. 1.6. Гистограмма распределения величины  $L$

Рассмотренный случай ограничивается целочисленными значениями величины  $L$  ( $L$  определена с точностью до 1 мм), поэтому полученная гистограмма может быть названа гистограммой для дискретной величины. Очевидно, что сама величина  $L$  непрерывна, однако погрешность ее определения велика и именно она определяет шаг изменения  $L$ . В случае, если рассматриваемая величина определяется с меньшей погрешностью и соседние значения в распределении отстоят друг от друга на интервал, превышающий значение погрешности, удобнее вводить интервалы изменения величины и определять количество реализаций, попавших в каждый из интервалов. В таком случае принято говорить о гистограмме для непрерывной величины.

#### 1.6.4. Суммарная погрешность измерений

Помимо случайной, при использовании в эксперименте каких-либо измерительных приборов, необходимо учитывать **приборную (систематическую) погрешность**. В паспорте прибора принято указывать предел допустимой погрешности  $\theta$ , означающий максимально возможную погрешность при рекомендованных условиях работы прибора. Если бы приборная погрешность была распределена по нормальному закону, то из такого определения  $\theta$  следовало бы, что распределение характеризуется средним квадратичным отклонением  $\sigma_{\text{приб}} = \theta/3$ .

Для электроизмерительных стрелочных приборов принято указывать **класс точности**, записываемый в виде числа, например, 0,05 или 4,0. Это число дает максимально возможную погрешность прибора, выраженную в **процентах** от наибольшего значения величины, измеряемой в данном диапазоне работы прибора. Так, для вольтметра, работающего в диапазоне измерений 0-30 В, класс точности 1,0 определяет, что указанная погрешность при положении стрелки в любом месте шкалы не превышает

0,3 В. Соответственно среднее квадратичное отклонение  $\sigma_{\text{приб}}$  составляет 0,1 В.

Реальная погрешность прибора существенно зависит от условий окружающей среды, где установлен прибор. Например, погрешность электроизмерительных приборов зависит от температуры помещения, и отличается от паспортной погрешности, которая обычно приводится для 20 °С. Другой причиной погрешностей может быть электромагнитное излучение другого лабораторного оборудования, вибрация установки и т.д. При планировании эксперимента для повышения точности измерений может возникнуть необходимость в учете этих факторов.

Обычно цена наименьшего деления шкалы стрелочного прибора согласована с погрешностью самого прибора. Если класс точности используемого прибора неизвестен, за погрешность  $\sigma_{\text{приб}}$  всегда принимают **половину** цены его наименьшего деления. В связи с этим не следует при считывании показаний со шкалы стараться определить доли деления, так как результат измерения от этого не станет точнее.

Предел допустимой погрешности цифрового измерительного прибора рассчитывают по паспортным данным, содержащим формулу для расчета погрешности именно данного прибора. При отсутствии паспорта за оценку погрешности  $\sigma_{\text{приб}}$  принимают единицу наименьшего разряда цифрового индикатора.

Окончательный результат многократного измерения содержит в себе как случайную, так и приборную (систематическую) погрешности. Поскольку случайная погрешность уменьшается с увеличением количества измерений, целесообразно **сделать такое количество измерений**, чтобы

$$(\Delta x)_{\text{случ}} \ll \theta, \quad (1.30)$$

т.е. чтобы случайной погрешностью можно было пренебречь по сравнению с приборной погрешностью. На практике достаточно, чтобы случайная

погрешность была в 2-3 раза меньше систематической. В любом случае надо сделать 2-3 измерения, чтобы убедиться в том, что случайная погрешность действительно мала.

Если приборная и случайная погрешности близки по значению, то суммарная погрешность равна

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{случ})^2 + (\sigma_{приб})^2} . \quad (1.31)$$

Поскольку случайную погрешность обычно оценивают с доверительной вероятностью 0,68, а  $\theta$  - оценка максимальной погрешности прибора, то можно считать, что выражение задает доверительный интервал также с вероятностью не меньшей 0,68.

При выполнении однократного измерения оценкой погрешности результата служит  $\Delta x = \theta/3$ , учитывающая только предельно допустимую приборную погрешность.

### 1.6.5. Погрешности косвенных измерений

Пусть исследуемую величину  $s$  определяют по результатам прямых измерений других независимых физических величин, например,  $x, y, z$ , с которыми она связана заранее установленным функциональным математическим соотношением

$$S = f(x, y, z). \quad (1.32)$$

Также известны окончательные результаты прямых измерений  $x_{ср} \pm \Delta x$ ,  $y_{ср} \pm \Delta y$ ,  $z_{ср} \pm \Delta z$ . Тогда для среднего значения:

$$s_{ср} = f(x_{ср}, y_{ср}, z_{ср}) \quad (1.33)$$

Для погрешности:

$$\Delta s = \sqrt{(f'_x)^2 \Delta x^2 + (f'_y)^2 \Delta y^2 + (f'_z)^2 \Delta z^2} , \quad (1.34)$$

где  $f'_x, f'_y, f'_z$  – частные производные в точке  $(x_{cp}, y_{cp}, z_{cp})$ .

Следует помнить, что при непосредственных расчетах в формулу необходимо подставлять погрешности  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , найденные для одного и того же значения доверительной вероятности. Погрешность косвенного измерения  $s$  также будет соответствовать этому значению доверительной вероятности. Рекомендуется использовать значение вероятности  $\alpha = 0,68$ .

Сравнение между собой величин  $f'_x \Delta x, f'_y \Delta y, f'_z \Delta z$  дает возможность выделить «критический» фактор, процесс измерения которого делает наибольший вклад в погрешность  $\Delta s$ . Например, если величина  $f'_x \Delta x$  больше остальных более чем в 2-3 раза, то их вкладом в погрешность можно пренебречь. Для повышения точности измерения величины  $s$  в первую очередь надо повышать точность измерения «критического» фактора  $\Delta s$ .

Для наиболее распространенных зависимостей в табл. 1.6 приведены формулы для расчета погрешности:

Таблица 1.6

Расчетная формула	Формула погрешности
$s = A \cdot x \pm B \cdot y \pm C \cdot z$	$\Delta s = \sqrt{(A \cdot \Delta x)^2 + (B \cdot \Delta y)^2 + (C \cdot \Delta z)^2}$
$s = A \cdot x^{\pm\alpha} \cdot y^{\pm\beta} \cdot z^{\pm\gamma}$	$\delta s = \sqrt{(\alpha \cdot \delta x)^2 + (\beta \cdot \delta y)^2 + (\gamma \cdot \delta z)^2}$
$s = \ln(x)$	$\Delta s = \Delta x / x$
$s = e^x$	$\delta s = \Delta x$
$s = A \cdot \sin(\varphi)$	$\Delta s = A \cdot \cos(\varphi) \cdot \Delta \varphi$

В таблице приняты следующие обозначения:  $\Delta$  – для абсолютной погрешности,  $\delta$  – для относительной погрешности,  $A, B, C, \alpha, \beta, \gamma$  – постоянные,  $x, y, z, \square$  – результаты прямых измерений,  $s$  – результат косвенного измерения.



Одной из типичных ошибок планирования эксперимента является косвенное измерение величины  $s$  через разность измеряемых напрямую величин  $A$  и  $B$ , если их абсолютные значения много больше значения величины  $s$  (например, поиск толщины стенки трубы через измерение ее внешнего и внутреннего радиусов). При этом погрешность  $\Delta s$  будет того же порядка или может даже превосходить значение искомой величины  $s$ . Аналогично – деление друг на друга больших величин или степень с маленьким основанием и большим показателем. Во всех этих случаях необходимо искать альтернативные пути.

#### 1.6.6. Запись окончательного результата измерения

Завершением обработки данных многократного прямого измерения при заданной доверительной вероятности являются два числа: среднее значение измеренной величины и его погрешность (полуширина доверительного интервала). Оба числа есть окончательный результат многократного измерения и должны быть совместно записаны в **стандартной форме**

$$x = x_{\text{ср}} \pm \Delta x, \quad (1.35)$$

которая содержит только **достоверные**, т.е. надежно измеренные, разряды этих чисел.

#### Порядок выполнения округления

1. Выполнить предварительную запись окончательного результата измерения в виде  $x = \pm \Delta x$  и вынести за общую скобку одинаковые порядки среднего и погрешности, т.е. множитель вида  $10^k$ , где  $k$  – целое число. Числа в скобках переписать в десятичном виде с использованием запятой, убрав тем самым оставшиеся порядковые множители.

2. Округлить в скобках число, соответствующее погрешности: до одной значащей (ненулевой) цифры слева, если эта цифра больше 2, или до двух первых цифр в противном случае. При округлении используют правило симметричного округления: если цифра, расположенная за оставляемой, меньше 5, то ее просто отбрасывают, иначе оставляемую цифру увеличивают на единицу. Если же отбрасываемая цифра равна 5, то наименьшая ошибка достигается при округлении по правилу Гаусса до ближайшего четного числа. К примеру, 4,5 округляют до 4, в то время как 3,5 также округляют до 4.

3. Округлить в скобках число, соответствующее среднему значению: последними справа оставляют цифры тех разрядов, которые сохранились в погрешности после ее округления.

4. Окончательно записать  $x = x \pm \Delta x$  с учетом выполненных округлений. Общий порядок и единицы измерения величины приводят за скобками.

## **2. Основные методы измерений и измерительные приборы**

### **2.1. Классификация методов и средств измерений**

В силу большого разнообразия средств измерения существует довольно широкий набор их классификационных признаков. Рассмотрим основные.

#### **2.1.1. Электроизмерительные и радиоизмерительные приборы**

Электроизмерительные приборы применяются для измерений на постоянном токе и в области низких частот (20-2500 Гц) токов, напряжений, электрических мощностей, частоты, фазовых сдвигов, сопротивлений, емкостей и других величин, характеризующих режим работы электрических цепей и параметры их элементов. Обозначение таких приборов состоит из буквы русского алфавита, характеризующей тип измерительного механизма, и числа, определяющего вид и тип прибора: *Д* - электродинамические; *И* - индукционные; *М* - магнитоэлектрические; *Н* - самопишущие; *Р* - меры, измерительные преобразователи, приборы для измерения параметров элементов электрических цепей; *С* - электростатические; *Т* - термоэлектрические; *Ф* - электронные, фотоэлектронные, цифровые; *Ц* - выпрямительные и комбинированные; *Э* - электромагнитные. Например: *С197* - киловольтметр электростатический. К обозначению могут добавляться буквы *М* (модернизированный), *К* (контактный) и другие, отмечающие конструктивные особенности или модификации приборов.

Радиоизмерительные приборы применяются для измерения разнообразных электрических и радиотехнических величин как на постоянном токе, так и в широком диапазоне частот, а также для наблюдения и исследования формы радиосигналов и характеристик радиоэлектронных устройств, генерации испытательных сигналов и питания измерительных устройств. Система обозначений данных приборов

соответствует ГОСТ 15094-86 и состоит из: буквы русского алфавита, определяющей характер измерений и вид измеряемых величин (табл. 2.1); цифры (от 1 до 9), обозначающей тип измерительного прибора, и через дефис  $n$ -значного числа ( $n = 1, 2, 3$ ), указывающего порядковый номер модели. Например: *B7-65* – вольтметр (подгруппа В) универсальный (тип В7) модели номер 65. В обозначении приборов, подвергшихся модернизации, после номера модели добавляется русская буква в алфавитном порядке (например, *B7-65A*); для обозначения приборов с одинаковыми электрическими характеристиками, различающимися лишь конструктивным исполнением, используется дополнительная цифра, которая пишется через дробь после номера модели (например, *B7-65/1*). Многофункциональные приборы могут иметь в обозначении типа дополнительную букву «К» (например, *СК6-13*).

Таблица 2.1

Подгруппа	Наименование подгруппы
<b>А</b>	Приборы для измерения силы тока
<b>Б</b>	Источники питания для измерений и измерительных приборов
<b>В</b>	Приборы для измерения напряжения
<b>Г</b>	Генераторы измерительные
<b>Д</b>	Аттенюаторы и приборы для измерения ослаблений
<b>Е</b>	Приборы для измерения параметров компонентов и цепей с сосредоточенными постоянными
<b>И</b>	Приборы для импульсных измерений

<b>К</b>	Комплексные измерительные установки
<b>Л</b>	Приборы общего применения для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов
<b>М</b>	Приборы для измерения мощности
<b>Н</b>	Меры и калибраторы
<b>П</b>	Приборы для измерения напряженности поля и радиопомех
<b>Р</b>	Приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными
<b>С</b>	Приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра
<b>У</b>	Усилители измерительные
<b>Ф</b>	Приборы для измерения фазового сдвига и группового времени запаздывания
<b>Х</b>	Приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств
<b>Ц</b>	Анализаторы логических устройств
<b>Ч</b>	Приборы для измерения частоты и времени
<b>Ш</b>	Приборы для измерения электрических и магнитных свойств материалов
<b>Э</b>	Измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов
<b>Я</b>	Блоки радиоизмерительных приборов

### **2.1.2. Классификация методов измерений**

Методы измерений можно классифицировать по различным признакам. Для общеметрологического анализа важными являются традиционные классификации, основанные на следующих признаках:

- 1) физический принцип, положенный в основу измерения;
- 2) режим взаимодействия средства измерений с объектом;
- 3) вид применяемых средств измерений;
- 4) вид хранителя единицы физической величины и характер измерительных операций.

По первому признаку все методы измерений делятся на электрические, магнитные, акустические, оптические и т.д. По режиму взаимодействия их можно разделить на статические и динамические, контактные и бесконтактные методы. По виду применяемых средств измерений - на аналоговые и цифровые. По последнему признаку выделяют следующие основные методы измерений:

- а) метод отклонений: простой и дифференциальный;
- б) нулевой метод: компенсационный и метод замещения.

Конкретному методу измерений соответствуют определенные измерительные действия, структура построения измерительной системы, а также алгоритм определения результата измерения.

Рассмотрим в общих чертах структуры измерительных систем, реализующие перечисленные методы измерения.

Простой метод отклонений – это метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия, заранее градуированного в единицах измеряемой физической величины.

На рис. 2.1 представлена структура измерительной системы для измерения по простому методу отклонений (здесь ИП - измерительный преобразователь).

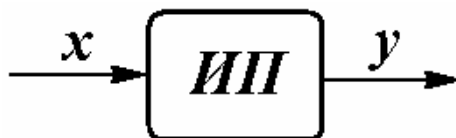


Рис. 2.1. Структура простого метода отклонения

Этому методу соответствует преобразование вида:

$$x = y[X], \quad (2.1)$$

где  $x$  - измеряемая величина;  $y$  - числовое значение величины;  $[X]$  - единица физической величины.

Примерами измерительных систем, реализующих простой метод отклонений, являются измерительная линейка, пружинный динамометр, стрелочный прибор для измерения силы электрического тока или напряжения и др. В этом случае измерительный прибор выступает в качестве хранителя единицы физической величины.

Сущность дифференциального метода отклонений состоит в том, что на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. Под мерой в метрологии понимают средство измерения, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. На рис.2.2 показана структура измерительной системы, в основе которой лежит дифференциальный метод отклонений.

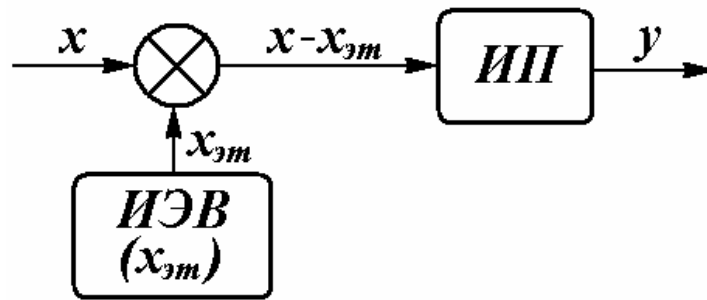


Рис. 2.2. Структура дифференциального метода отклонений

В структурную схему измерительной системы по этому методу добавлен источник эталонной величины  $X_{эт}$  (ИЭВ) и средство сравнения однородных величин (компаратор). Задачей последнего является получение разности между измеряемой величиной и известной величиной эталонного источника. Уравнением преобразования в данном случае будет выражение вида:

$$x - x_{эт} = y \cdot [X]. \quad (2.2)$$

Примером реализации данного метода измерений является измерительная система с применением дифференциальной термопары для измерения температуры объекта исследования. Один спай такой термопары устанавливается на объекте измерений, а второй - в термостат с известной температурой, например, сосуд Дьюара с кубиками тающего льда. Здесь термопара играет роль и измерительного преобразователя и суммирующего элемента. Термо-ЭДС, вырабатываемая такой термопарой, будет прямо пропорциональна разности температур между объектом измерения и термостатом.

К нулевым относят методы, в которых результирующий эффект воздействия измеряемой и эталонной величин на компаратор измерительной системы доводят до нуля. При этом балансировка измерительной системы может осуществляться либо программно, либо адаптивно.



На рис. 2.3 представлена структура измерительной системы, реализующей нулевой компенсационный метод.

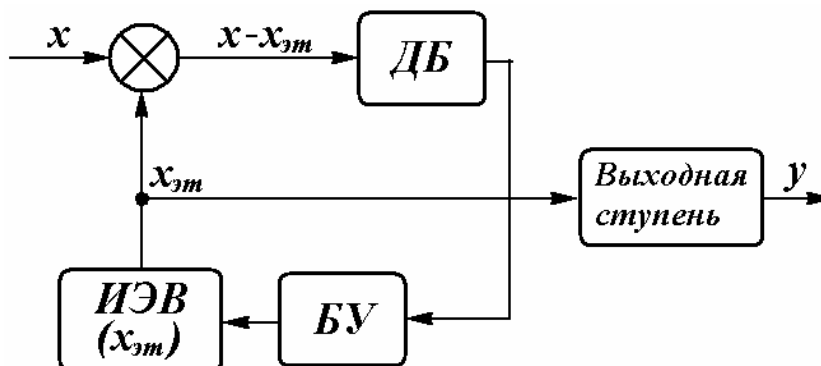


Рис. 2.3. Структура компенсационного метода измерений

Структурная схема измерительной системы включает компаратор, детектор балансировки (ДБ), балансировочное устройство (БУ), источник эталонной величины (ИЭВ) и выходную ступень. С помощью балансирующего устройства и детектора балансировки источник эталонной величины настраивают таким образом, чтобы разность  $(x - x_{эт})$  стремилась к 0. При выполнении этого условия измеряемая величина  $x$  будет равна  $x_{эт}$ . Выходная ступень измерительной системы реализует уравнение преобразования:

$$x_{эт} = y \cdot [X]. \quad (2.3)$$

Примерами реализации компенсационного метода являются рычажные весы с гирями, мост Уитстона для измерения электрического сопротивления. Для расширения возможностей измерительной системы с использованием компенсационного метода в последнюю вводят дополнительное числовое множество  $k$ , называемое делителем или аттенуатором. При этом измерительная система приводится к нулю изменением  $k$  или ИЭВ (рис. 2.4).

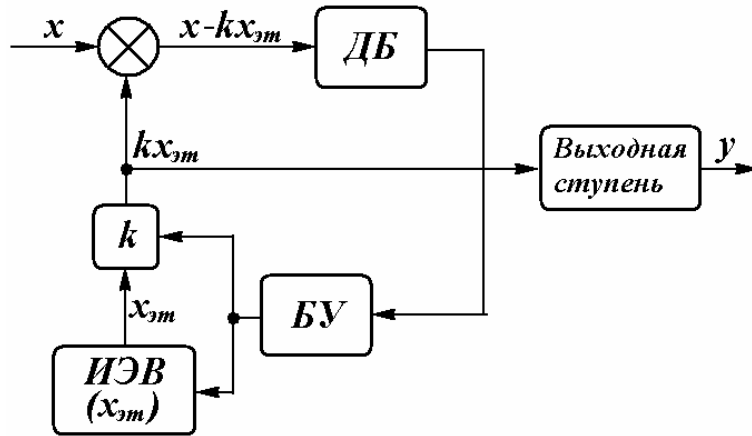


Рис. 2.4. Структура компенсационного метода измерений с делителем

В компенсационном методе сравнение  $x$  и  $x_{э\tau}$  ведется непосредственно и одновременно.

На рис.2.5 представлена структура измерительной системы, реализующей нулевой метод замещения.

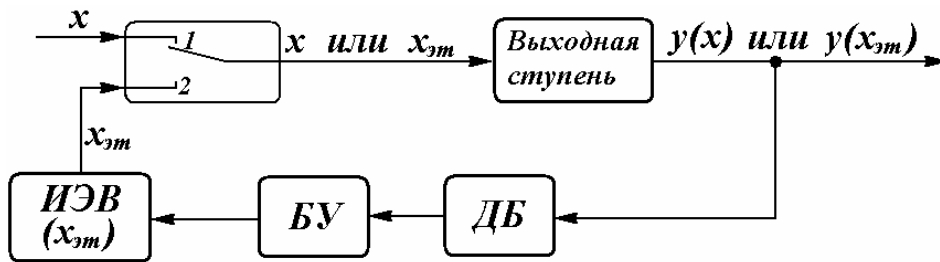


Рис.2.5. Структура метода замещения

В этом методе измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой. Сравнение  $x$  и  $x_{э\tau}$  в данном случае не осуществляется непосредственно и одновременно.

Примером данного метода может являться взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов.

## 2.2. Измерение постоянных и низкочастотных напряжений и токов

К числу важнейших величин относятся измерения напряжения и силы тока (в литературе и на практике принято говорить об измерении тока, но в принципе измеряют силу тока). Специфика измерений этих величин связана с формой измеряемых сигналов, особенно это характерно для радиотехнических цепей. Несмотря на ограниченное применение таких характеристик сигналов, как напряжение и сила тока, вольтметры и амперметры являются достаточно востребованными типами приборов.

Измерения напряжения и силы тока в электрических цепях относятся к наиболее распространенным видам измерений. При этом преобладающее значение имеет измерение напряжения, так как чаще всего этой величиной принято характеризовать режимы работы различных цепей и устройств.

К тому же параллельный метод подключения вольтметра к участку цепи, как правило, не приводит к нарушению электрических процессов в ней, поскольку входное сопротивление прибора выбирается достаточно большим. При измерениях же тока приходится размыкать исследуемую цепь и в ее разрыв последовательно включать амперметр, внутреннее сопротивление которого отлично от нуля. Однако в ряде случаев необходимы как прямые, так и косвенные измерения силы тока, поэтому вопросы измерения напряжения и тока рассматриваются совместно.

Задача измерения постоянных напряжения и силы тока заключается в нахождении их значения и полярности. Целью измерения переменных напряжения и силы тока является определение какого-либо их параметра. Так как напряжение и сила тока связаны, согласно закону Ома, линейной зависимостью, чаще проводят измерение напряжения и по его значению аналитически вычисляют силу тока.

Из курса физики известно, что напряжение между точками  $A$  и  $B$  есть скалярная величина, определяемая выражением

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{L}, \quad (2.4)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля;  $L$  — расстояние между точками  $A$  и  $B$ .

Современные методы и средства измерений позволяют измерять напряжения в диапазоне  $10^{-10} \dots 10^6$  В и силу тока в диапазоне  $10^{-18} \dots 10^5$  А. Вместе с тем данные измерения должны осуществляться в очень широкой полосе частот — от постоянного тока до сверхвысоких частот. Такие крайние значения величин требуют уникальных методов измерения.

Измерение параметров переменного напряжения — сложная метрологическая задача, связанная с обеспечением требуемого частотного диапазона и учетом формы кривой измеряемого сигнала. Переменное напряжение (переменный ток) промышленной частоты имеет синусоидальную форму

$$U(\tau) = U_m \sin(\omega\tau + \varphi), \quad (2.5)$$

его мгновенное значение  $U(\tau)$  характеризуется несколькими основными параметрами: амплитудой  $U_m$ , круговой частотой  $\omega\tau$  и начальной фазой  $\varphi$ .

Уровень переменного напряжения может быть определен по *амплитудному, среднему квадратическому* (часто в технической литературе употребляется термины *«среднеквадратическое», «действующее»* и *«эффективное»*, которые соответствующим ГОСТом относятся к нерегламентируемым), *среднему (постоянной составляющей)* или *средневыпрямленному* значениям.

**Мгновенные значения напряжения**  $U(\tau)$  наблюдают на экране осциллографа или другого индикаторного устройства и определяют в каждый момент времени (рис. 2.6).

**Амплитуда** (*высота, устаревшее — пиковое значение*)  $U_m$  — наибольшее мгновенное значение напряжения за время наблюдения или за период.

Измеряемые напряжения могут иметь различный вид по форме импульсов, гармонических или негармонических колебаний — суммы синусоиды с постоянной составляющей и т.д. (рис.2.6, а, б, в). При разнополярных несимметричных кривых формы напряжения различают два амплитудных значения (рис.2.6, г): положительное  $U_m^+$  и отрицательное  $U_m^-$ .

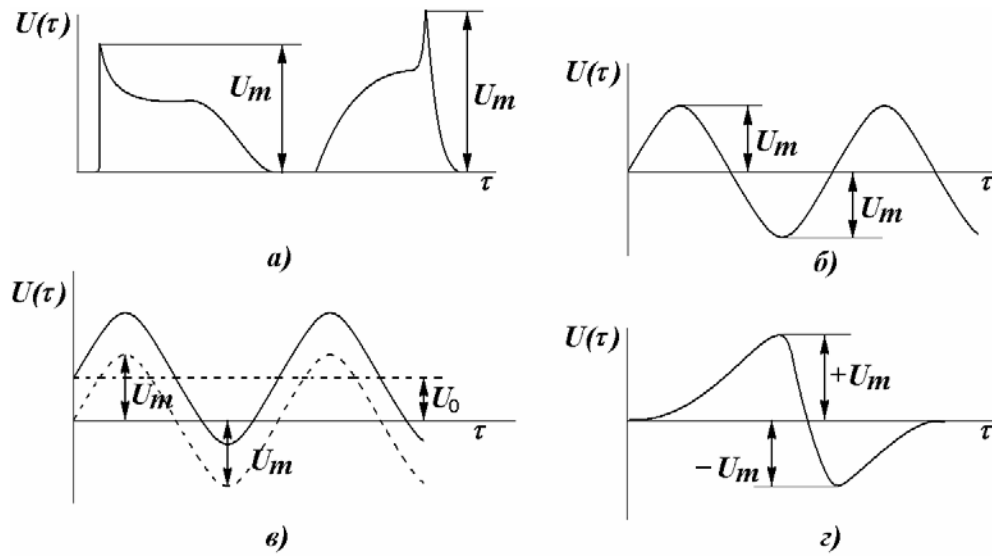


Рис. 2.6. Иллюстрации к понятию амплитуда напряжения:

а - импульсы положительной полярности; б - синусоидальное напряжение; в – сумма синусоиды и постоянной составляющей  $U_0$ ; г - несинусоидальное колебание.

**Среднее квадратическое значение** напряжения определяется как корень квадратный из среднего квадрата мгновенного значения напряжения за время измерения (или за период):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(\tau) d\tau}. \quad (2.6)$$

Если периодический сигнал несинусоидален, то квадрат среднего квадратического значения равен сумме квадратов постоянной составляющей и средних квадратических значений гармоник:

$$U^2 = U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots \quad (2.7)$$

Среднее значение (постоянная составляющая) напряжения равно среднему арифметическому всех мгновенных значений за период:

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T U(\tau) d\tau. \quad (2.8)$$

**Средневыпрямленное** напряжение определяется как среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений за период:

$$U_{cpB} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(\tau)| d\tau. \quad (2.9)$$

Для напряжения одной полярности среднее и средневыпрямленное значения равны. В случае разнополярных напряжений эти два значения могут существенно отличаться друг от друга. Так, для гармонического напряжения  $U_{cp} = 0$ ,  $U_{cpB} = 0,637 U_m$ .

Наиболее часто измеряют среднее квадратическое значение напряжения, так как этот параметр связан с мощностью, нагревом, потерями. Однако проще измерить амплитудное или средневыпрямленное значение и произвести пересчет с применением коэффициентов амплитуды  $K_a$  и формы  $K_\phi$ . В частности, для синусоидальной (гармонической) формы переменного напряжения:  $K_a = 1,41$ ;  $K_\phi = 1,11$ . Значения этих коэффициентов для наиболее употребляемых в радиотехнических цепях и средствах измерения видов сигналов и соотношения между ними даны в табл. 4.1, где  $k_y$  – коэффициент усреднения.

Таблица 2.2

Форма сигнала	$k_a$	$k_\phi$	$k_y$
Синусоидальная	1,41	1,11	1,57
Треугольная	1,73	1,16	2
Прямоугольная со скважностью $Q$	$\sqrt{Q}$	$\sqrt{Q}$	$Q$
Меандр	1	1	1
Постоянный ток	1	1	1

### 2.3. Основные типы приборов, измеряющих напряжение и силу тока

Напряжение и силу тока измеряют приборами непосредственной оценки или приборами, использующими метод сравнения (компенсаторами). По структурному построению всевозможные приборы, измеряющие напряжение и силу тока, условно можно разделить на три основных типа:

- электромеханические;
- электронные аналоговые;
- цифровые.

#### 2.3.1. Электромеханические приборы

Для измерения напряжения и силы тока 5-20 лет назад (иногда еще и в настоящее время) широко применялись электромеханические приборы. Приборы этих систем часто входят в состав и других, более сложных, средств измерений.

По физическому принципу, положенному в основу построения и конструктивному исполнению, эти приборы относятся к группе аналоговых средств измерения, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины.

Электромеханические приборы непосредственной оценки измеряемой величины представляют класс приборов аналогового типа, обладающих рядом положительных свойств: просты по устройству и в эксплуатации, обладают высокой надежностью и на переменном токе реагируют на среднее квадратическое значение напряжения. Последнее обстоятельство позволяет измерять наиболее информативные параметры сигнала без методических ошибок. Электромеханические измерительные приборы строят по обобщенной структурной схеме, показанной на рис. 2.7.



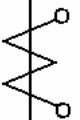
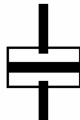
Рис. 2.7. Структурная схема электромеханического прибора

Измерительная схема электромеханического прибора состоит из совокупности сопротивлений, индуктивностей, емкостей и других элементов электрической цепи прибора и осуществляет количественное или качественное преобразование входной величины  $x$  в электрическую величину  $x'$ , на которую реагирует измерительный механизм. Последний преобразует электрическую величину  $x'$  в механическое угловое или линейное перемещение  $\alpha$ , значение которого отражается на шкале отсчетного устройства, проградуированной в единицах измеряемой величины  $N(x)$ . Для этого необходимо, чтобы каждому значению измеряемой величины соответствовало одно и только одно определенное отклонение  $\alpha$ . При этом параметры схемы и измерительного механизма не должны меняться при изменении внешних условий: температуры



окружающей среды, частоты питающей сети и других факторов. Классификацию электромеханических приборов производят на основании типа измерительного механизма. Наиболее распространенными в практике радиотехнических измерений являются следующие системы: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, электростатическая. В табл. 2.3 приведены символы, принятые для условного обозначения этих систем

Таблица 2.3

	<p>магнитоэлектрическая измерительная система</p>
	<p>электромагнитная измерительная система</p>
	<p>электродинамическая измерительная система</p>
	<p>электростатическая измерительная система</p>

Условное обозначение типа измерительной системы наносится на шкале прибора или средства измерения.

**Магнитоэлектрическая система.** В этой системе (рис. 2.8) измерительный механизм состоит из проволочной рамки с протекающим в ней током, помещенной в поле постоянного магнита (магнитопровода). Поле в зазоре, где находится рамка, равномерно за счет особой

конфигурации магнитопровода. Под воздействием тока  $I$  рамка вращается в магнитном поле, угол поворота  $\alpha$  ограничивают специальной пружиной, поэтому передаточная функция (часто называемая уравнением шкалы) линейна:

$$\alpha = I \frac{\Psi_0}{W}, \quad (2.10)$$

где  $\Psi_0$  - удельное потокосцепление, определяемое параметрами рамки и магнитной индукцией;  $W$  - удельный противодействующий момент, создаваемый специальной пружиной.

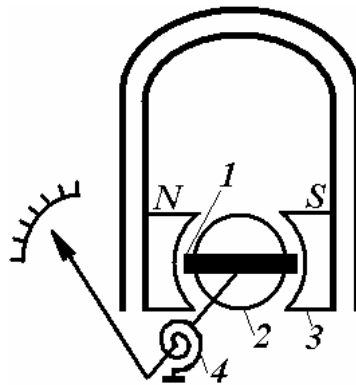


Рис 2.8. Магнитоэлектрическая измерительная система:

- $1$  – рамка с измеряемым током и стрелкой;  $2$  – неподвижный сердечник;  
 $3$  – полюсные наконечники;  $4$  – возвратная пружина

На основе магнитоэлектрического механизма создаются вольтметры, амперметры, миллиамперметры и другие измерительные приборы, и их структурное построение главным образом определяется измерительной схемой. Измерительные приборы магнитоэлектрической системы имеют достаточно высокую точность, сравнительно малое потребление энергии из измерительной цепи, высокую чувствительность, но работают лишь на постоянном токе.

Для расширения пределов измерения токов амперметрами и напряжений вольтметрами применяют шунты и добавочные сопротивления, которые включают соответственно параллельно и последовательно индикаторам в схемы этих приборов.

Основное использование: переносные, лабораторные, многопредельные амперметры и вольтметры постоянного тока. Класс точности 0,05 ... 0,5, потребляемая мощность  $P_{\text{соб}} \approx 10^{-5} \dots 10^{-4}$  Вт.

**Гальванометры.** Особую группу измерителей тока составляют высоко чувствительные магнитоэлектрические приборы, применяемые в нуль-индикаторах, схемах сравнения или указателях равновесия, называемые гальванометрами. Их задача показать наличие или отсутствие тока в цепи, поэтому они работают в начальной точке шкалы и должны обладать большой чувствительностью. Гальванометры снабжают условной шкалой и не нормируют по классам точности.

Чувствительность гальванометров выражается в мм или делениях (например,  $S_i \approx 10^9$  мм/А). Такая высокая чувствительность достигается за счет особой конструкции прибора.

Поскольку чувствительность гальванометров очень высока, их градуировочная характеристика нестабильна и зависит от совокупности внешних влияющих факторов. Поэтому при выпуске на производстве чувствительные гальванометры не градуируют в единицах измеряемой физической величины и им не присваивают классы точности. В качестве же метрологических характеристик гальванометров обычно указывают их чувствительность к току или напряжению и сопротивление рамки. Современные гальванометры позволяют измерять токи  $10^{-5} \dots 10^{-12}$  А и напряжения до  $10^{-4}$  В.

**Электромагнитная система.** Принцип действия электромагнитной системы (рис. 2.9) основан на взаимодействии катушки с ферромагнитным сердечником. Ферромагнитный сердечник втягивается в катушку при любой полярности протекающего по ней тока. Это обусловлено тем, что ферромагнетик располагается в магнитном поле катушки так, что поле усиливается. Следовательно, прибор электромагнитной системы может работать на переменном токе. Однако электромагнитные приборы все же являются низкочастотными, так как с ростом частоты сильно возрастает индуктивное сопротивление катушки.

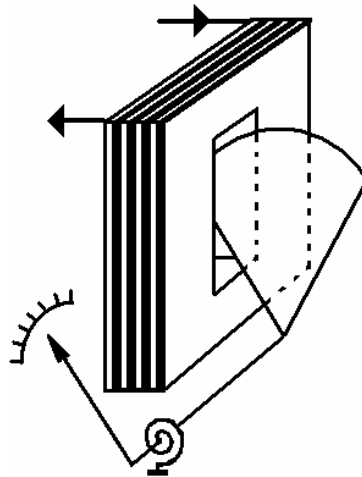


Рис. 2.9. Электромагнитная измерительная система

Уравнение шкалы или передаточная функция электромагнитной измерительной системы выражается как:

$$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha}, \quad (2.11)$$

где  $I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_2^2 dt$ ,  $L$  - индуктивность катушки.

Достоинствами приборов электромагнитной системы являются простота конструкции, способность выдерживать значительные

перегрузки, возможность градуировки приборов, предназначенных для измерений в цепях переменного тока, на постоянном токе. К недостаткам приборов этой системы можно отнести большое собственное потребление энергии, невысокую точность, малую чувствительность и сильное влияние магнитных полей.

На практике применяют амперметры электромагнитной системы с пределами измерения от долей ампера до 200 А и вольтметры – от долей вольта до сотен вольт. Основное использование в виде щитовых и лабораторных переносных низкочастотных ( $f = 0 \dots 5$  кГц) амперметров и вольтметров. Класс точности 0,5...2,5, потребляемая мощность  $P_{\text{соб}} = 1 \dots 6$  Вт.

**Электродинамическая система** – измерительный механизм содержит две измерительные катушки: неподвижную и подвижную. Принцип действия основан на взаимодействии катушек, электромагнитные поля которых взаимодействуют в соответствии с формулой:

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \cos \theta \frac{\partial M}{\partial \alpha}, \quad (2.12)$$

где  $I_1$  — ток через неподвижную катушку;  $I_2$  — ток через подвижную катушку;  $\theta$  — фазовый сдвиг между синусоидальными токами;  $M$  — коэффициент взаимной индуктивности катушек.

На основе электродинамического механизма в зависимости от схемы соединения обмоток могут выполняться вольтметры, амперметры, ваттметры. Достоинством электродинамических вольтметров и амперметров является высокая точность на переменном токе. Предел основной приведенной погрешности может быть 0,1-0,2 %, что является наилучшим достижимым показателем для измерительных приборов переменного тока. По другим показателям электродинамические приборы

близки к электромагнитным. Электродинамические приборы используются как образцовые лабораторные низкочастотные высокого класса точности измерительные приборы.

Класс точности 0,1...0,2, потребляемая мощность  $P_{\text{соб}} = 1$  Вт, частотный диапазон 0...5 кГц.

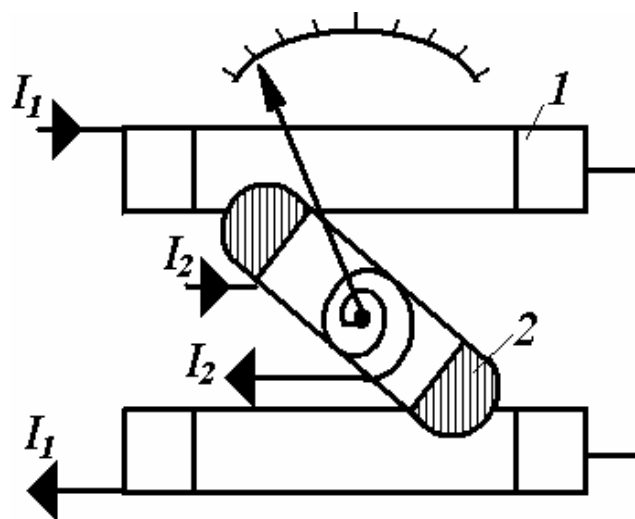


Рис. 2.10. Электродинамическая измерительная система:

1 - неподвижная катушка, 2 - подвижная катушка

**Электростатические приборы** – принцип действия электростатического механизма основан на взаимодействии электрически заряженных проводников. Подвижная алюминиевая пластина, с закрепленной на ней стрелкой, перемещается, взаимодействуя с неподвижной пластиной. Ограничение движения (как и в других электромеханических системах) осуществляется пружиной. Электростатические приборы по принципу действия механизма являются вольтметрами. Достоинства этих приборов: широкий частотный диапазон (до 30 МГц) и малая мощность, потребляемая из измерительной цепи. Приборы измеряют среднее квадратическое значение напряжения.

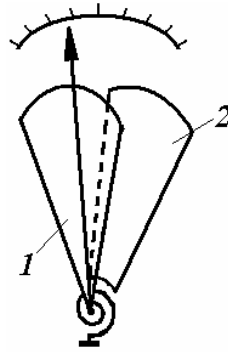


Рис. 2.11. Электростатическая измерительная система:

1- подвижная пластина; 2 – неподвижная пластина.

Уравнение преобразования записывается в виде:

$$\alpha = \frac{1}{2W} U^2 \frac{dC}{d\alpha}, \quad (2.13)$$

где  $U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt$ ,  $C$  – емкость между пластинами.

Электростатические приборы используются в основном в качестве высокочастотных лабораторных и высоковольтных вольтметров. Класс точности 0,5...1,5, потребляемая мощность  $P_{\text{собр}} \leq 1$  мВт, частотный диапазон 0...30 МГц.

### 2.3.2. Магнитоэлектрические приборы с преобразователями переменного тока в постоянный

Описанные выше приборы не решают многих проблем, возникающих при измерении на переменном токе: электромагнитный и электродинамический – низкочастотны, электростатический обладает низкой чувствительностью. Применение магнитоэлектрического механизма в сочетании с преобразователем позволяет существенно расширить возможности измерений на переменном токе. По типу

преобразователя данные приборы делятся на выпрямительные и термоэлектрические.

Выпрямительные приборы представляют собой сочетание измерительного механизма магнитоэлектрической системы с выпрямителем на полупроводниковых диодах.

Схемы соединений диодов с измерительными механизмами можно разделить на две основные группы: однополупериодные и двухполупериодные.

Наиболее распространены приборы с двухполупериодными схемами выпрямления.

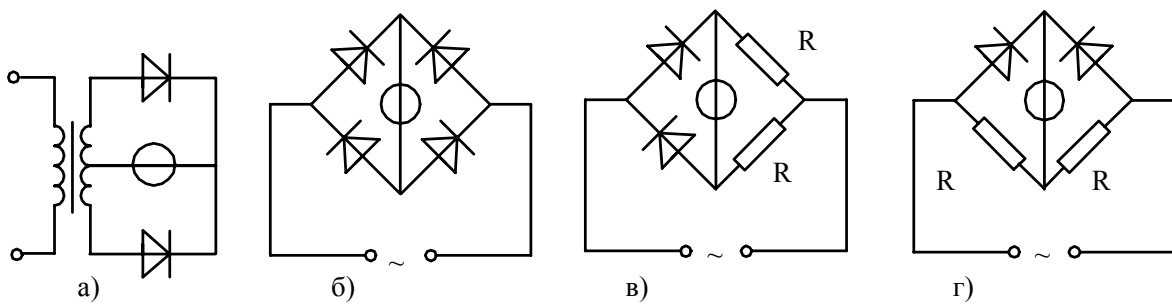


Рис. 2.12. Схемы соединений диодов с измерительными механизмами:

*a* - трансформаторная; *б* - мостовая; *в, г* - мостовая с заменой двух диодов резисторами

Уравнение шкалы для этого класса преобразователей с однополупериодным выпрямлением записывается в виде:

$$\alpha = \frac{\Psi_0}{W} I_{cp.с} \quad (2.14)$$

где  $I_{cp.с} = \frac{1}{T} \int_0^T |i| dt$  - среднев्यпрямленное значение синусоидального тока;  $T$  - период.



Для схемы с двухполупериодным выпрямлением вращающий момент увеличивается вдвое и угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{\Psi_0}{2W} I_{cp.в} \cdot \quad (2.15)$$

В силу того что магнитоэлектрическая измерительная система реагирует на постоянный (средневыпрямленный) ток, показания прибора будут пропорциональны средневыпрямленному значению переменного тока или напряжения. Данное обстоятельство является очень существенным, так как приборы проградуированы в средних квадратических значениях синусоидального тока. Это значит, что на шкале прибора представлено не то значение, на которое реагирует прибор (т.е. средневыпрямленное), а величина, умноженная на коэффициент формы синусоиды  $K_\phi = 1,11$ .

При измерении параметров переменного негармонического сигнала практически всегда возникает методическая погрешность. Например, при градуировке измерительного прибора на синусоидальном токе точке шкалы 100 В соответствовало средневыпрямленное значение напряжения 90 В. Если на этот измерительный прибор подать напряжение, имеющее форму меандра с амплитудой 90 В (напомним, что у такого сигнала:  $K_a = K_\phi = 1$ , т.е.  $U_m = U = U_{cp.в} = 90$  В), его показания также будут около 100 В ( $1,11 U_{cp.в}$ ) и абсолютная погрешность измерения напряжения составит  $\Delta = 100 - 90 = 10$  В.

Выпрямительные приборы применяются как комбинированные измерители постоянного и переменного тока и напряжения с пределами измерения тока от 1 мА до 600 А, напряжения от 0,1 до 600 В.

Достоинствами выпрямительных приборов являются высокая чувствительность, малое собственное потребление энергии и возможность

измерения в широком диапазоне частот. Частотный диапазон выпрямительных приборов определяется применяемыми диодами. Так, использование точечных кремниевых диодов обеспечивает измерение переменных токов и напряжений на частотах  $50 \dots 10^5$  Гц. Основными источниками погрешностей приборов являются изменения параметров диодов с течением времени, влияние окружающей температуры, а также отклонение формы кривой измеряемого тока или напряжения от той, при которой произведена градуировка прибора. Выпрямительные приборы выполняются в виде многопредельных и многоцелевых лабораторных измерительных приборов. К этому типу измерительных приборов относится так называемый тестер.

Наименьшие пределы измерения переменных токов и напряжений 0,25-0,3 мА и 0,25-0,3 В, малое собственное потребление мощности, широкий частотный диапазон (до 10-20 кГц).

Недостатки: невысокая точность (классы точности 1,0-2,5); зависимость показаний от формы кривой измеряемой величины.

Область применения: многопредельные ампервольтметры выпрямительные фазометры и самопишущие частотомеры.

Термоэлектрические приборы представляют собой сочетание измерительного механизма магнитоэлектрической системы и одного или нескольких термоэлектрических преобразователей.

Термоэлектрическая измерительная система строится на основе термоэлектрического преобразователя и магнитоэлектрического микроамперметра. Термопреобразователь состоит из нагревателя, по которому протекает измеряемый ток, и термопары, на концах которой возникает термо-ЭДС. В цепь термопары включен микроамперметр, измеряющий термоток. Рабочий спай термопары находится в тепловом

контакте с нагревателем. Нагреватель представляет собой тонкую проволоку из металлического сплава с высоким удельным сопротивлением (нихром, манганин). Еще более тонкие проволочки из термоэлектродных материалов применяют для изготовления термопар. При прохождении измеряемого тока через нагреватель место его контакта с термопарой нагревается, а холодный спай остается при температуре окружающей среды.

Термо-ЭДС, развиваемая термоэлектрическим преобразователем, пропорциональна количеству теплоты, выделяемой измеряемым током в месте присоединения спаев. Количество теплоты, в свою очередь, пропорционально квадрату измеряемого тока. Значение тока  $I_0$ , протекающего через измерительный механизм может быть определено как  $I_0 = E/r$ , где  $E$  – термо-ЭДС;  $R$  - полное сопротивление цепи постоянного тока. Следовательно, показания термоэлектрического прибора пропорциональны квадрату действующего значения тока в нагревателе, т.е.  $\alpha = kI^2$ , где  $k$  - постоянный коэффициент, зависящий от конструкции и типа термоэлектрического преобразователя и параметров измерительного механизма.

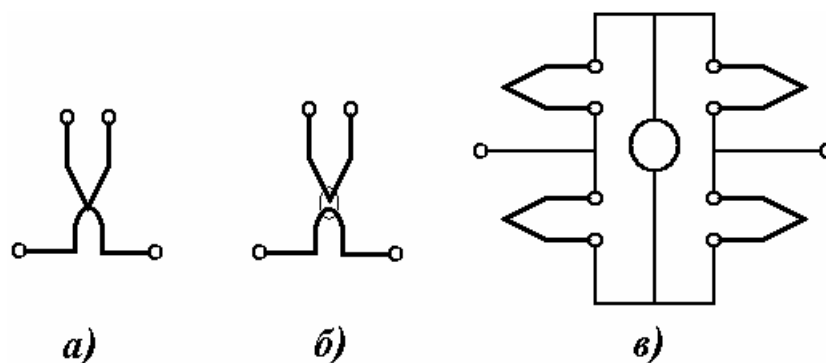


Рис. 2.13. Схемы соединений термоэлектрических преобразователей:

а) контактная; б) бесконтактная; в) мостовая.

Функционирование прибора основано на тепловом действии тока, и поэтому магнитоэлектрический прибор с термоэлектрическим преобразователем измеряет среднее квадратическое значение переменного тока любой формы.

Термоэлектрические приборы применяют в основном для измерения токов. В качестве вольтметров они практически не используются, так как их входное сопротивление чрезвычайно мало. Достоинством термоэлектрических приборов является широкий частотный диапазон (до 10 МГц). Недостатки: невысокая чувствительность, низкий класс точности (1,5...4,0), большое потребление энергии из измерительной цепи, малая перегрузочная способность, неравномерная шкала.

### **Компенсаторы постоянного тока**

Рассмотренные ранее приборы электромеханической группы являются приборами непосредственной оценки измеряемого параметра и все (в большей или меньшей степени) потребляют мощность из измерительной цепи, что может приводить к нарушению работы исследуемого объекта. Измерение тока и напряжения аналоговыми электромеханическими приборами возможно в лучшем случае с погрешностью 0,1% (класс точности прибора 0,1). Более точные измерения можно выполнить методом сравнения с мерой. Средства измерений, использующие метод сравнения, называются компенсаторами или потенциометрами.

Компенсаторы – приборы, в которых измерение производится методом сравнения измеряемой величины с эталонной. Принцип действия компенсатора основан на уравнивании (компенсации) измеряемого напряжения известным падением напряжения на образцовом резисторе. Момент полной компенсации фиксируется индикаторным прибором (нуль-индикатором). Разработаны компенсаторы переменного и постоянного

тока. Компенсационный метод применяется также в цифровых измерительных приборах.

Упрощенная принципиальная схема компенсатора постоянного тока для измерения напряжения  $U_x$  показана на рис. 2.14.

Источник постоянного напряжения  $E_0$  обеспечивает протекание рабочего тока  $I_p$  по цепи, состоящей из последовательно включенных измерительного  $R_u$ , установочного (образцового)  $R_y$  и регулировочного

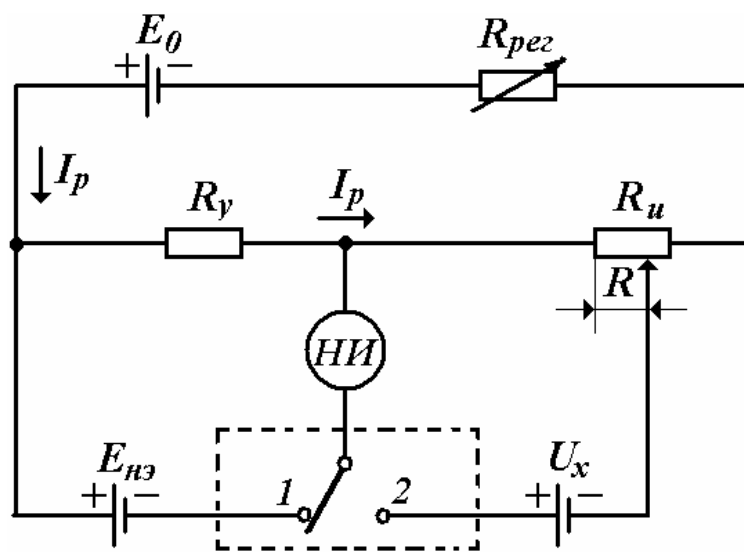


Рис. 2.14. Упрощенная принципиальная схема компенсатора постоянного тока

$R_{рег}$  резисторов. В качестве источника образцовой ЭДС (меры ЭДС) используется нормальный элемент  $E_{нэ}$ , изготавливаемый по специальной технологии гальванический элемент, среднее значение ЭДС которого при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  известно с точностью до пятого знака и равно  $E_{нэ} = 1,0186$  В. Установочный резистор  $R_y$  представляет точно известное и стабильное сопротивление. В схеме элемент  $НИ$  — нуль-индикатор, реагирующий на очень маленькие постоянные токи (чувствительность по

току  $S_{ни}$  порядка  $10^{-10}$  А/дел). Относительная погрешность нормального элемента может быть в пределах от 0,02 до 0,0002%. С помощью переключателя нуль-индикатор вначале включается в цепь установочного сопротивления  $R_y$  (положение переключателя 1). При этом регулировочным сопротивлением  $R_{рег}$  добиваются отсутствия тока в цепи нуль-индикатора. Это означает, что  $I_p R_y = E_{нэ}$ , откуда значение рабочего тока определяется через соотношение  $I_p = E_{нэ}/R_y = 10^{-n}$  А (для каждого типа компенсатора величина  $n$  - число индивидуальное и неизменное, что обеспечивается постоянством параметров источника напряжения  $E_{нэ}$  и установочного сопротивления  $R_y$ ).

Затем нуль-индикатор включается в измерительную цепь (положение переключателя 2) и изменением положения движка потенциометра  $R$  добиваются нулевого тока, а значит, равенства  $U_x = I_p R = E_{нэ} R/R_y$ . Итак, измеряемое напряжение определяется с достаточно высокой точностью и без нарушения работы измерительной цепи, так как в момент измерения ток через индикатор не протекает.

С помощью компенсатора можно также определять ток в исследуемом устройстве, преобразовав его предварительно в напряжение согласно формуле

$$I_x = U_x/R_0, \quad (2.16)$$

где  $R_0$  образцовое сопротивление.

При измерениях напряжений на производстве применение находят автоматические компенсаторы, в которых поддерживается разностное значение  $\Delta U_x = I_p R_{нач} - I_p R_{кон} \rightarrow 0$  с помощью следящей системы. Здесь  $R_{нач}$  и  $R_{кон}$  части измерительного сопротивления в начале и конце цикла слежения.

В современных конструкциях компенсаторов вместо нормального элемента часто применяются эталонные (в частности стабилизированные) источники напряжения с более высоким значением коэффициента стабилизации, что позволяет расширить верхний предел измерения компенсатора до нескольких десятков вольт.

Погрешность компенсатора постоянного тока определяется погрешностями резисторов  $R_x$ ,  $R_y$ , ЭДС нормального элемента  $E_{нэ}$ , а также чувствительностью нуль-индикатора. Современные потенциометры постоянного тока имеют класс точности от 0,0005 до 0,2. Верхний предел измерения до 1...2,5 В. При достаточной чувствительности нуль-индикатора нижний предел измерения может составлять единицы нановольт. Компенсационные методы используются также для измерений и на переменном токе.

### **2.3.3. Аналоговые электронные вольтметры**

При измерении напряжения методом непосредственной оценки вольтметр подключается параллельно участку исследуемой цепи. Для уменьшения методической погрешности измерения собственное потребление вольтметра должно быть мало, а его входное сопротивление велико. Поэтому в последние годы в основном используются электронные вольтметры. Электронные вольтметры представляют собой сочетание электронного преобразователя и измерительного прибора. В отличие от вольтметров электромеханической группы электронные вольтметры постоянного и переменного токов имеют высокие входное сопротивление и чувствительность, широкие пределы измерения и частотный диапазон (от 20 Гц до 1000 МГц), малое потребление тока из измерительной цепи.

Классифицируют электронные вольтметры по ряду признаков:

- по назначению – вольтметры постоянного, переменного и импульсного напряжений, универсальные, фазочувствительные, селективные;
- по способу измерения — приборы непосредственной оценки и приборы сравнения;
- по характеру измеряемого значения напряжения — амплитудные (пиковые), среднего квадратического значения, средневыпрямленного значения;
- по частотному диапазону — низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные.

Кроме того, все электронные приборы можно разделить на две большие группы: аналоговые электронные со стрелочным отсчетом и приборы дискретного типа с цифровым отсчетом.

В соответствии с общепринятыми обозначениями отечественным электронным вольтметрам присваивается индекс В. Например ВК7-16А — вольтметр комбинированный (К) — может измерять сопротивление; 7 — универсальный на постоянный и переменный ток; 16 — номер разработки; А — модификация. Вольтметры постоянного тока имеют индексацию В2, а вольтметры переменного тока — В3.

При измерениях силы тока электронным вольтметром вначале ток преобразуется в напряжение, а затем определяется по формуле:  $I_x = U_x / R_0$ .

В настоящее время аналоговые электронные вольтметры постоянного тока находят ограниченное применение, так как они по своим техническим свойствам сильно уступают цифровым вольтметрам постоянного тока. Поэтому дальше рассматриваются только аналоговые вольтметры



переменного тока. Частотный диапазон таких вольтметров может составлять сотни мегагерц.

Чтобы обеспечить необходимую точность вольтметра, к усилителям постоянного тока, применяемым в электронных вольтметрах, предъявляются жесткие требования в отношении линейности амплитудной характеристики, постоянства коэффициента усиления, температурного и временного дрейфа нуля. При построении электронных вольтметров для измерения малых напряжений эти требования не всегда могут быть удовлетворены. Поэтому электронные вольтметры переменного тока для измерения малых напряжений выполняются по схеме с предварительным усилением переменного напряжения. Эта схема применяется в милливольтметрах, поскольку обладает большой чувствительностью вследствие наличия дополнительного усилителя переменного тока. Однако это уменьшает частотный диапазон схемы до сотен килогерц, так как возникают трудности при создании широкополосного усилителя.

Элементная база, используемая при создании вольтметров переменного тока, определяется существующим на момент их создания уровнем техники, однако функциональное назначение блоков идентично. При этом особенно важную роль выполняют преобразователи переменного напряжения в постоянное (детекторы). Детекторы можно классифицировать по функции преобразования входного напряжения в выходное: амплитудные (пиковые), среднего квадратического и средневывпрямленного значения. Тип детектора во многом определяет свойства прибора: вольтметры с амплитудными детекторами являются самыми высокочастотными; вольтметры с детекторами среднего квадратического значения позволяют измерять напряжение любой формы; вольтметры средневывпрямленного значения измеряют только гармонические сигналы, но являются самыми простыми и надежными.

**Амплитудный детектор** это устройство, напряжение на выходе которого (т.е. на нагрузке) соответствует максимальному (амплитудному) значению измеряемого напряжения. Чтобы цепь нагрузки детектора эффективно отфильтровывала постоянную составляющую и подавляла паразитные высокочастотные гармоники, необходимо выполнение неравенства:

$$\frac{1}{\omega C_n} \leq R_n, \quad (2.17)$$

где  $C_n$  — емкость фильтра;  $R_n$  — сопротивление нагрузки детектора.

Еще одно условие эффективной работы детектора – сопротивление резистора  $R_n$  должно быть значительно больше сопротивления диода в его прямой проводимости, что практически всегда выполняется. На рис. 2.15 изображены принципиальная и эквивалентная схемы и временные диаграммы амплитудного детектора с параллельным включением диода (детектор с закрытым входом).

Рассмотрим работу детектора (рис. 2.15, а) при подаче на его вход гармонического напряжения  $U_x(t) = U_m \sin \omega t$ .

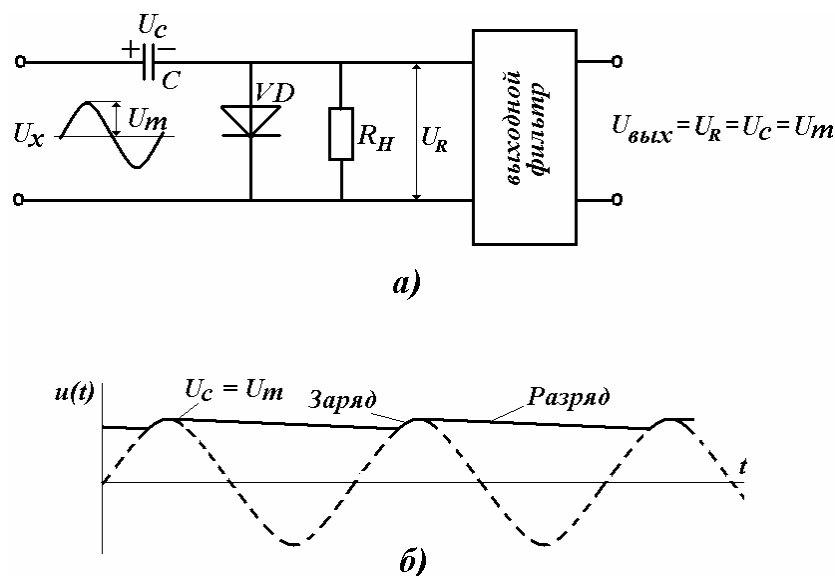


Рис. 2.15. Принцип действия пикового детектора

На интервалах времени, когда на вход детектора поступает положительная полуволна, конденсатор  $C$  заряжается через диод, сопротивление  $R_0$  которого в открытом состоянии мало. Постоянная времени заряда  $\tau_z = R_0 C$  невелика и заряд конденсатора до максимального значения  $U_m$  происходит быстро. На интервале действия отрицательной полуволны диод закрыт и конденсатор  $C$  медленно разряжается на сопротивлении нагрузки  $R_n$ , так как оно выбирается достаточно большим (50...100 МОм). Итак, постоянная разряда  $\tau_p = R_n C$  оказывается значительно больше периода  $T = 2\pi/\omega$  входного переменного напряжения. В результате конденсатор останется заряженным до напряжения, близкого к  $U_c = U_m = U_{вых}$ . Временные диаграммы, поясняющие работу пикового детектора, представлены на рис. 2.15, б. Изменение напряжения на сопротивлении нагрузки  $R_n$  определяется разностью амплитуды входного напряжения  $U_x$  и напряжения на конденсаторе  $U_c$  т.е.  $U_R = U_x - U_c$ . Таким образом, выходное напряжение  $U_R$  будет пульсирующим с удвоенной амплитудой измеряемого напряжения, как подтверждают простые математические вычисления.

Для выделения постоянной составляющей сигнала на выходе детектора ставится емкостной фильтр, подавляющий остальные гармоники.

Нетрудно заметить, что чем меньше период исследуемого сигнала (чем выше частота), тем точнее выполняется равенство  $U_c = U_m$ . Этим объясняются высокочастотные свойства детектора.

Одним из достоинств аналоговых вольтметров с амплитудным детектором является независимость показаний прибора от формы сигнала. Обычно шкала амплитудных вольтметров градуируется в средних квадратических значениях синусоидального напряжения, т.е. показания прибора:  $U_{np} = U_m/K_a$ .

**Детектор среднего квадратического значения** это преобразователь переменного напряжения в постоянное, пропорциональное корню квадратному из среднего квадрата мгновенного значения напряжения. Значит, измерение действующего напряжения связано с выполнением трех последовательных операций: возведение в квадрат мгновенного значения сигнала, усреднение и извлечение корня из результата усреднения (последняя операция обычно осуществляется при градуировке шкалы вольтметра). Возведение в квадрат мгновенного значения, как правило, производят ячейкой с полупроводниковым элементом путем использования квадратичного участка его характеристики; иногда этот участок создается искусственно.

На рис. 2.16, *а* представлена диодная ячейка  $D_1R_{1c}$ , в которой постоянное напряжение  $E_1$  приложено к диоду  $D_1$  таким образом, что он оказывается закрытым до тех пор, пока измеряемое напряжение  $u(t)$  на резисторе  $R_1$  не превысит величины  $E_1$ .

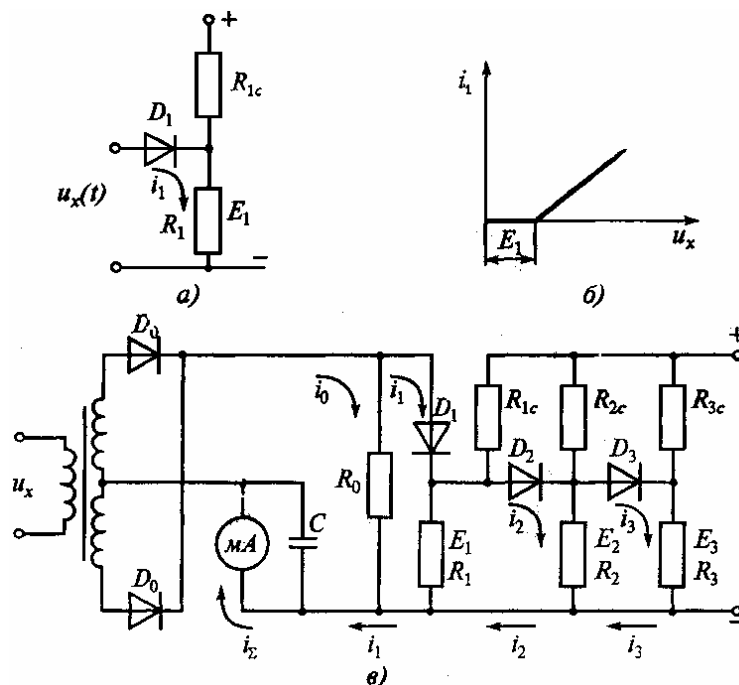


Рис. 2.16. Детектор среднего квадратического значения:

*а* — диодная ячейка; *б* — идеализированная характеристика;

*в* — схема квадратичного детектора

Следует иметь в виду, что начальный квадратичный участок вольт-амперной характеристики полупроводникового диода имеет, как правило, малую протяженность (рис. 2.16, б), поэтому эту часть удлиняют искусственно, по методу кусочно-линейной аппроксимации, для этого в схеме детектора используют несколько идентичных диодных ячеек (рис. 2.16, в), аналогичных показанной на рис. 2.16, а. Линейный участок обобщенной вольт-амперной характеристики при этом увеличивается.

**Детектор средневыпрямленного значения** – устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянный ток, пропорциональный средневыпрямленному значению напряжения. Структура выходного тока измерительного прибора с детектором средневыпрямленного значения аналогична ранее рассмотренному узлу выпрямительной системы и поэтому их свойства во многом идентичны (зависимость от формы сигнала, частотные характеристики, класс точности). Аналоговый электронный вольтметр средневыпрямленного значения имеет более высокую чувствительность и меньшее потребление мощности от измерительной цепи (за счет дополнительного усиления), чем прибор со схемой выпрямления.

#### **2.3.4. Цифровые вольтметры**

По виду измеряемой величины цифровые вольтметры делятся на: вольтметры постоянного тока, переменного тока (средневыпрямленного или среднего квадратического значения), импульсные вольтметры для измерения параметров видео- и радиоимпульсных сигналов и универсальные вольтметры, предназначенные для измерения напряжения постоянного и переменного тока, а также ряда других электрических и неэлектрических величин (сопротивления, температуры и пр.).

Принцип работы цифровых измерительных приборов основан на дискретном и цифровом представлении непрерывных измеряемых величин. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра приведена на рис. 2.17. Схема состоит из входного устройства, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), цифрового отсчетного устройства и управляющего устройства.

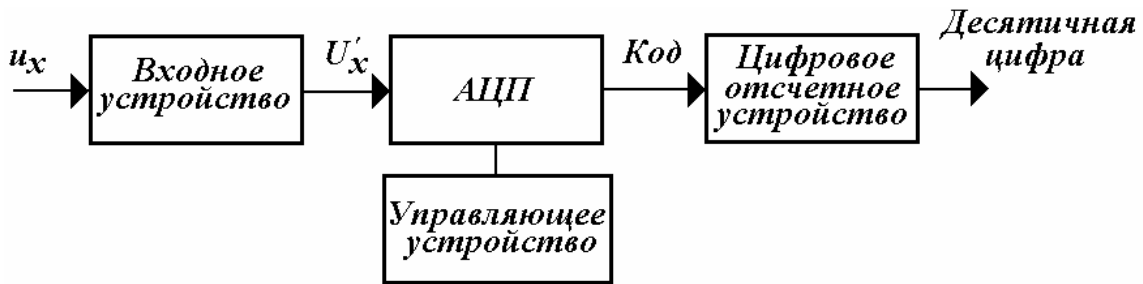


Рис. 2.17. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра

Входное устройство содержит делитель напряжения; в вольтметрах переменного тока оно включает в себя также преобразователь переменного тока в постоянный.

АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой, представляемый цифровым кодом. Процесс аналого-цифрового преобразования составляет сущность любого цифрового прибора, в том числе и вольтметра. Использование в АЦП цифровых вольтметров двоично-десятичного кода облегчает обратное преобразование цифрового кода в десятичное число, отражаемое цифровым отсчетным устройством.

Цифровое отсчетное устройство измерительного прибора регистрирует измеряемую величину. Управляющее устройство объединяет и управляет всеми узлами вольтметра.

По типу АЦП цифровые вольтметры могут быть разделены на четыре основные группы:

- кодоимпульсные (с поразрядным уравниванием);
- времяимпульсные;
- частотно-импульсные;
- пространственного кодирования.

В настоящее время цифровые вольтметры строятся чаще на основе кодоимпульсного и времяимпульсного преобразования.

АЦП вольтметров преобразуют сигнал постоянного тока в цифровой код, поэтому и цифровые вольтметры также считаются приборами постоянного тока. Для измерения напряжения переменного тока на входе вольтметра ставится преобразователь переменного напряжения в постоянное напряжение, чаще всего это детектор средневыпрямленного значения.

К основным техническим характеристикам среднестатистического цифрового вольтметра постоянного тока относятся:

- диапазон измерения: 100 мВ, 1 В, 10 В, 100 В, 1000 В;
- порог чувствительности (уровень квантования амплитуды напряжения или единица дискретности) на диапазоне напряжения в 100 мВ может быть 1 мВ, 100 мкВ, 10 мкВ;
- количество знаков (длина цифровой шкалы) отношение максимальной измеряемой величины на этом диапазоне к минимальной, например, диапазону измерения 100 мВ при уровне квантования 10 мкВ соответствует  $10^4$  знаков;

- входное сопротивление электрической схемы очень высокое, обычно более 100 МОм;

- помехозащищенность так как цифровые вольтметры обладают высокой чувствительностью, очень важно обеспечить хорошую помехозащищенность. Упрощенная структурная схема, поясняющая принцип возникновения помех на входе цифрового вольтметра показана на рис. 2.18.

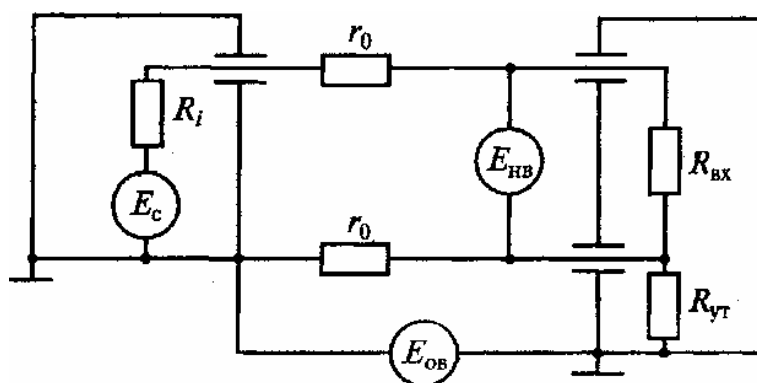


Рис. 2.18. Схема возникновения помех на входе цифрового вольтметра

Помеха общего вида возникает в электрической схеме из-за несовершенства источников питания на частотах 50 и 100 Гц, создает падение напряжения на сопротивлении  $r_0$  соединительного провода и переходит во входную цепь вольтметра, если сопротивление утечки  $R_{ут}$  между клеммами и корпусом невелико. Если же одну из клемм прибора заземлить, то доля помехи общего вида, переходящая во входную цепь, увеличится. Поэтому при измерении малых сигналов пользуются изолированным от земли (корпуса) входом вольтметра.

Способы уменьшения влияния помех:

- использование экранированных проводов и изолированного входа вольтметра;



- применение интегрирующих вольтметров; при этом период помехи  $U_{ном}(t) = U_{мном} \sin \omega t$  кратен времени измерения и помеха устраняется по периоду согласно формуле:

$$U_{ном} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{мном} \sin \omega t dt \rightarrow 0; \quad (2.18)$$

- включение на входе вольтметра фильтра с большим коэффициентом подавления помехи (60...70 дБ). В последнем случае коэффициент подавления помехи определяется следующим образом:

$K_{под} = 20 \lg (U_{н вх} / U_{н вых})$ , где  $U_{н вх}$  – амплитуда помехи на входе фильтра,

$U_{н вых}$  - амплитуда помехи на его выходе.

**Точность цифровых вольтметров.** Распределение погрешности по диапазону измерения напряжений определяется *пределом допустимой относительной основной погрешности*, характеризующей класс точности средства измерения:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} 100\% = \pm \left[ c + d \left( \left| \frac{U_k}{u} \right| - 1 \right) \right], \quad (2.19)$$

где  $u$  — измеряемое напряжение;  $U_k$  — конечное значение диапазона измерений;  $c, d$  — соответственно относительные приведенные суммарная и аддитивная составляющие погрешности.

**Быстродействие.** Современные схемы АЦП, применяемые в цифровых вольтметрах, могут обеспечить очень большое быстродействие, однако из соображений точной регистрации полученного результата и усреднения сетевой помехи у цифровых вольтметров оно уменьшается примерно до 20...50 измерений в секунду.

## **2.4. Измерение электрической мощности**

К измерению мощности практически прибегают во всем частотном диапазоне – от постоянного тока до миллиметровых и более коротких длин волн. Измерять уровни мощности приходится в очень широких пределах – от  $10^{-18}$  до  $10^8$  Вт.

В последние годы при измерениях наряду с абсолютными (ватт, милливатт и т.д.) широко используют относительные (логарифмические) единицы мощности (децибелы). Отметим, что относительные единицы измерения имеют ряд существенных преимуществ и применяются для оценки мощности источников радиотехнических сигналов, степени их усиления или ослабления, чувствительности приемных устройств, погрешностей измерений и пр.

Новые возможности в решении задач измерения мощности открыли достижения в области физики, микроэлектроники и особенно цифровой техники, позволившие автоматизировать измерительную процедуру и проводить ее в интерактивном режиме.

### **2.4.1. Общие сведения**

Как физическая величина, электрическая мощность определяется работой, совершаемой источником электромагнитного поля в единицу времени. Размерность электрической мощности записывается следующим образом: джоуль/сек = ватт.

Измерение мощности в различных частотных диапазонах имеет определенные особенности. Измерители электрической мощности промышленной частоты наряду со счетчиками энергии являются основой действующей системы учета потребления электрической энергии в народном хозяйстве. Измерение мощности на постоянном токе, а также в диапазоне звуковых и высоких частот имеет ограниченное значение, поскольку на частотах до нескольких десятков мегагерц часто удобнее

измерять напряжения, токи и фазовые сдвиги, а мощность определять расчетным путем. На частотах свыше 300 МГц вследствие волнового характера процессов значения напряжения и токов теряют однозначность, и результаты измерений начинают зависеть от места подключения прибора. Вместе с тем поток мощности через любое поперечное сечение линии передачи всегда остается неизменным. По этой причине основным параметром, характеризующим режим работы устройства СВЧ, становится мощность.

Активная (поглощаемая электрической цепью) мощность однофазного переменного тока определяется как:

$$P = UI \cos \varphi, \quad (2.20)$$

где  $U, I$  - средние квадратические значения напряжения и тока;  $\varphi$  — сдвиг фазы между мгновенными значениями напряжения и тока.

Если нагрузка  $R_n$  в электрической цепи чисто активная ( $\varphi = 0$ ), то мощность переменного тока:

$$P = UI = I^2 R_n = U^2 / R_n. \quad (2.21)$$

Для сигнала произвольной формы, имеющего периодическую структуру, электрическую мощность можно оценить с помощью ряда Фурье:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n, \quad (2.22)$$

где  $U_0, I_0$  - постоянные составляющие;  $U_n, I_n$  — средние квадратические значения гармоник напряжения и тока;  $\varphi_n$  — фазовый сдвиг между гармониками напряжения  $U_n$  и тока  $I_n$ .

Электрическую мощность переменного тока можно измерять непосредственно с помощью специальных приборов — *ваттметров*, или косвенно путем измерения величин, входящих в приведенные

соотношения. Принцип действия ваттметров основан на реализации операции умножения. Применяют устройства прямого и косвенного перемножения. Примерами устройств прямого перемножения являются измерительные механизмы ваттметров электродинамической системы. Прямое перемножение напряжения и тока можно обеспечить с помощью преобразователей Холла, или специальных схем на полевых транзисторах и т.д.

В устройствах косвенного перемножения произведение величин находят в результате использования таких математических операций, как сложение (вычитание), возведение в степень, логарифмирование, интегрирование и пр. Для этих целей служат аналоговые интегральные перемножители. Современные ваттметры на частоты 1...10 МГц строятся на основе интегральных перемножителей с использованием термопреобразователей.

#### **2.4.2. Измерение мощности в диапазонах низких и высоких частот**

При прямых измерениях в диапазонах частот до нескольких (1...10) килогерц могут иногда использоваться электродинамические ваттметры.

##### **Электродинамические ваттметры**

Принцип действия электродинамического ваттметра основан на том, что угол поворота  $\alpha$  рамки (со стрелкой) электродинамического прибора пропорционален произведению токов, умноженному на косинус угла  $\varphi$  между ними:

$$\alpha = k I_1 I_2 \cos\varphi, \quad (2.23)$$

где  $k$  – постоянный для данного прибора коэффициент.

Пусть требуется измерить активную мощность, потребляемую некоторой нагрузкой  $Z_n$ , к которой приложено действующее значение напряжения  $U_n$  и через нее протекает гармонический ток со средним

квадратическим значением  $I_n$  и сдвинутый по фазе на угол  $\varphi$  по отношению к напряжению.

Схема включения катушек ваттметра показана на рис. 2.19, где  $R_{доб}$  добавочное сопротивление. Если параметры ваттметра выбраны так, что  $R_{доб} \gg Z_n$ , то ток в неподвижной катушке  $I_1 \approx I_n$ , а в подвижной

$$I_2 \approx U_n / R_{доб}.$$

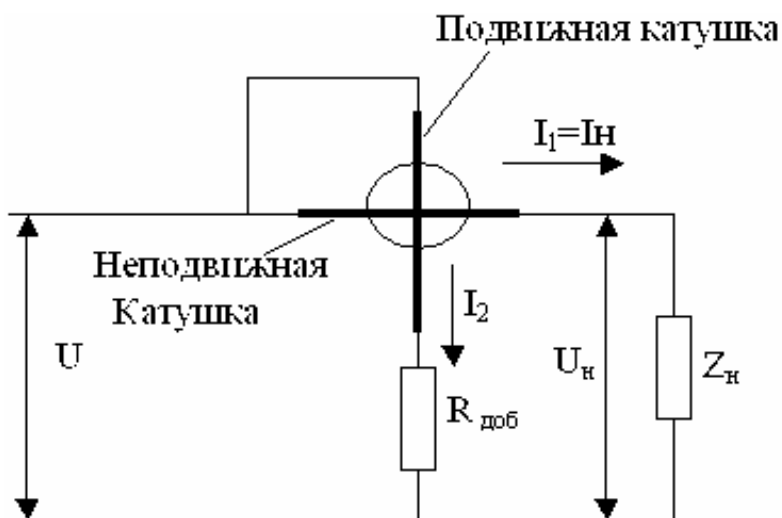


Рис. 2.19. Схема электродинамического ваттметра

Поэтому угол отклонения стрелки  $\alpha$  ваттметра с учетом (2.23) будет пропорционален активной мощности в нагрузке  $P$ :

$$\alpha \approx (k I_n U_n / R_{доб}) \cos \varphi \approx k P, \quad (2.24)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Ваттметры электродинамической системы могут применяться для измерения электрической мощности в цепях как постоянного, так и переменного тока, но наиболее широко их используют для измерения мощности промышленной частоты.

### 2.4.3. Ваттметры на интегральных аналоговых перемножителях

Интегральный перемножитель сигналов реализует передаточную функцию:

$$P_{\text{вых}} = k_a u_1 u_2, \quad (2.25)$$

где  $k_a$  — масштабный коэффициент, а  $u_1$  и  $u_2$  — перемножаемые аналоговые напряжения.

Рассмотрим упрощенную структурную схему аналогового интегрального перемножителя двух напряжений (рис. 2.20), в основу принципа действия которого заложен *четырёхквadrантный* метод перемножения.

В этой схеме (в технике измерения мощностей ее иногда называют квадратором) приняты следующие обозначения: (+) — сумматор; (-) — вычитающее устройство;  $(K\vartheta)$  — устройство возведения в квадрат;  $(:4)$  — делитель напряжения на четыре (этот элемент необязателен).

При перемножении двух аналоговых напряжений производятся операции:

суммирование:  $u_1 + u_2$ ;

вычитание:  $u_1 - u_2$ ;

возведение в квадрат:  $(u_1 + u_2)^2$ ,  $(u_1 - u_2)^2$ ;

вычитание квадратов:  $(u_1 + u_2)^2 - (u_1 - u_2)^2 = 4u_1 u_2$ ;

деление напряжения на четыре:  $4u_1 u_2 / 4 = u_1 u_2$ .

Чтобы применить перемножитель сигналов в схеме ваттметра, достаточно в качестве выходного каскада измерителя включить низкочастотный фильтр.

Если напряжения  $u_1 = U_m \cos \omega t$  и  $u_2 = I_m R \cos(\omega t - \varphi)$ ,

где  $R$  — эталонное сопротивление, то сигнал на выходе:

$$P_{\text{вых}} = k_a U_m I_m R \cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi). \quad (2.26)$$

Приняв коэффициент  $k_a = 1$ , сопротивление  $R = 1 \text{ Ом}$  и учитывая формулу произведения двух косинусов, получим:

$$P_{\text{вых}} = 0,5 U_m I_m R \cos(\varphi) + 0,5 U_m I_m R \cos(2\omega t - \varphi). \quad (2.27)$$

Выделенная специальным низкочастотным фильтром постоянная составляющая данной мощности будет пропорциональна измеряемой мощности, т. е.

$$P_0 = 0,5 U_m I_m \cos \varphi = U I \cos \varphi. \quad (2.28)$$

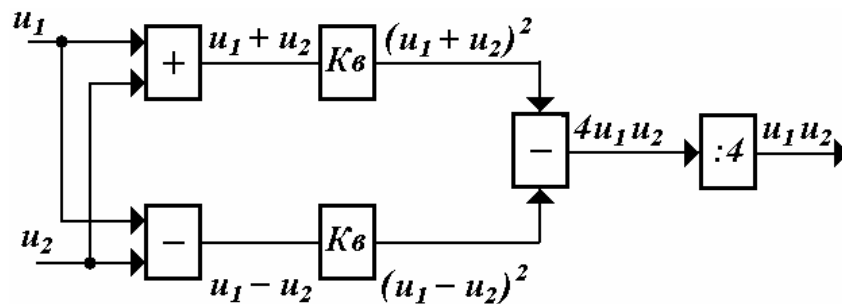


Рис.2.20. Структурная схема аналогового умножителя

В умножителях используют идентичные, со стабильными параметрами нелинейные элементы, имеющие квадратичные характеристики. Более высокую точность измерения мощности по методу прямого умножения двух сигналов обеспечивает операция интегрирования, которую применяют в прецизионных измерительных преобразователях активной мощности промышленной частоты.

По уровню измеряемых электрических мощностей все измерители мощности делятся на ваттметры малой (до 10 мВт), средней (10 мВт...10 Вт) и большой мощностей (свыше 10 Вт).

#### 2.4.4. Измерение мощности в диапазоне СВЧ

Большое практическое значение имеет измерение мощности СВЧ-колебаний. Способы измерения мощности СВЧ существенно отличаются от рассмотренных выше. Все они основаны на эквивалентном преобразовании энергии исходных электромагнитных колебаний в другой вид энергии, удобный для измерения. Косвенные методы, изложенные выше, не находят применения, так как токи и напряжения различны в разных сечениях линии передач (стоячие волны) и подключение измерительного прибора меняет режим работы измерительной цепи. Поэтому в СВЧ-диапазоне используют методы преобразования энергии электромагнитных колебаний в другой вид энергии, удобный для измерения. Различают два основных метода измерения мощности СВЧ-колебаний.

##### **Измерение мощности источника электромагнитных колебаний (генератора)**

Согласно общепринятому определению, под мощностью генератора понимают мощность, отдаваемую им в согласованную нагрузку. В этом случае измеряемая мощность полностью рассеивается на некотором измерительном эквиваленте нагрузки с последующим измерением мощности теплового процесса (рис. 2.21, *a*). Такие измерители мощности называются **ваттметрами поглощающего типа**. Так как нагрузка должна полностью поглощать измеряемую мощность, то использование прибора возможно лишь при отключенном потребителе. Результат измерения будет наиболее точным, если входное сопротивление измерительного прибора полностью согласовано с выходным сопротивлением исследуемого генератора или волновым сопротивлением линии передачи.



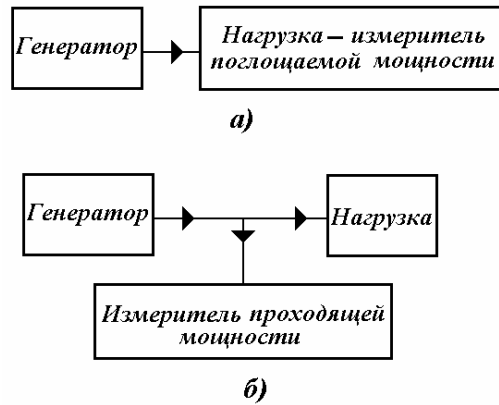


Рис. 2.21. Способы измерения мощности ваттметром:

*а* — поглощающей мощности, *б* — проходящей мощности

Для измерения электрической мощности, выделяемой в нагрузке, полное сопротивление которой может быть произвольно, между генератором и нагрузкой включается специальное устройство, преобразующее лишь незначительную часть передаваемой по линии энергии и практически не нарушающее процесс ее передачи (рис. 2.21, б).

### **Измерение мощности с помощью резистивных термочувствительных элементов (терморезисторов)**

Наиболее распространенным методом измерения малых мощностей, на котором построены промышленные ваттметры, является метод измерения сопротивления терморезистора при рассеянии в нем электромагнитной энергии. В качестве резистивных термочувствительных элементов используются болометры, сопротивление которых растет с повышением температуры (положительный температурный коэффициент сопротивления), и термисторы, сопротивление которых с ростом температуры падает. Основными преимуществами термисторов являются их высокая чувствительность и большая устойчивость к перегрузкам.

**Термистором** называют терморезистор, изготовленный из специального полупроводникового материала, обладающего большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, т.е. температурная характеристика термистора имеет отрицательный наклон. Применяют два типа термисторов: стержневой и бусинковый.

Стержневые термисторы обладают более высокой электрической прочностью и имеют относительно меньшее реактивное сопротивление. Термисторы бусинкового типа при прочих равных условиях имеют меньшую поверхность охлаждения и поэтому обладают большей чувствительностью. Чувствительность термисторов находится от 10 до 100 Ом/мВт. Для получения высокой чувствительности рабочую точку термистора выбирают на участке с максимальной крутизной характеристики.

Зависимость сопротивления термистора от температуры нагрева можно представить как

$$R_{\tau} = R_0 e^{\gamma \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right]}, \quad (2.29)$$

где  $R_0$  - сопротивление термистора при начальной температуре  $T_0$ ;  $T$  - температура нагрева термистора,  $^{\circ}\text{K}$ ;  $\gamma$  - постоянный коэффициент.

**Болометр** — проволочный или пленочный терморезистор с положительной температурной характеристикой, помещенный в стеклянный (вакуумный или наполненный инертным газом) баллон. Для увеличения чувствительности нить выполнена из материала с высоким температурным коэффициентом сопротивления. Болометры менее чувствительны, чем терморезисторы, но имеют более стабильные, не зависящие от температуры окружающей среды характеристики.

Экспериментально установлено, что между сопротивлением болометра  $R_T$  и мощностью  $P$ , рассеиваемой на нем, существует следующая зависимость:

$$R_T = R_0 + a P^b, \quad (2.30)$$

где  $R_T$  – сопротивление болометра, на котором рассеивается мощность  $P$ , мВт;  $R_0$  – начальное сопротивление болометра, Ом;  $a, b$  – постоянные коэффициенты, зависящие от материала и размеров нити болометра.

Термистор или болометр помещают внутрь измерительной головки, состоящей из отрезка волновода или коаксиальной линии. Изменение сопротивления терморезистора при рассеянии в нем электромагнитной энергии измеряется обычно с помощью мостовых схем. Используют два способа измерения сопротивления термистора: с помощью неуравновешенного и уравновешенного мостов. Неуравновешенные мосты применяют для построения измерителей мощности по типу приборов прямого действия, уравновешенные – в ваттметрах, основанных на методе сравнения. Схема неуравновешенного моста с терморезистором представлена на рис. 2. 22.

Исходное уравновешивание моста (при отсутствии измеряемой мощности СВЧ) обеспечивают схемой температурной компенсации, состоящей из потенциометра  $R$  плавной регулировки и вспомогательного генератора  $G$  с частотой выходных колебаний - 50...100 кГц. При равновесии моста ток в измерительной диагонали и показания гальванометра равны нулю.

Измеряемую мощность СВЧ  $P_{вх}$  подают на термистор  $R_t$ . Если схема измерителя согласована с генератором, то мощность полностью рассеивается на термисторе. В результате его сопротивление понизится и

через гальванометр начнет протекать ток. Шкалу гальванометра градуируют в единицах мощности, используя калиброванный источник постоянного тока  $E_{num}$ .

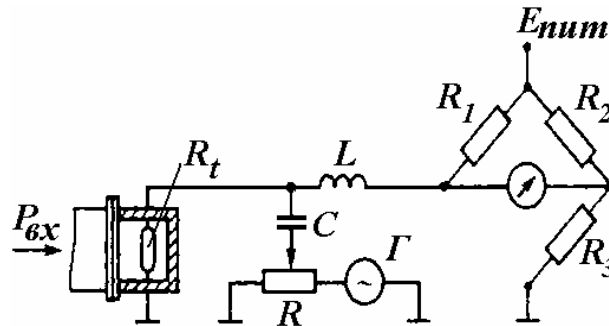


Рис. 2. 22. Схема неуравновешенного моста

К преимуществу измерителей электрической мощности с неуравновешенными мостами относится наглядность индикации результата измерений, а к недостатку — сравнительно малая точность. Последнее объясняется двумя основными причинами. Во-первых, неизбежное при измерении мощности СВЧ изменение сопротивления термистора влечет за собой нарушение согласования сопротивлений термисторной камеры и линии передачи электромагнитных колебаний. Вследствие этого возникает частичное отражение электромагнитной волны от нагрузки, а значит, неполное рассеяние измеряемой мощности на термисторе. Во-вторых, по мере естественного изменения характеристик термистора (или при его замене) нарушается установленное при градуировке соответствие между показаниями прибора и величиной рассеиваемой мощности.

Более высокую точность измерений обеспечивают уравновешенные мосты, в которых измеряемую мощность СВЧ сравнивают с калиброванной мощностью постоянного тока. Пример одной из схем измерительного уравновешенного моста с терморезистором представлен на рис. 2.23.

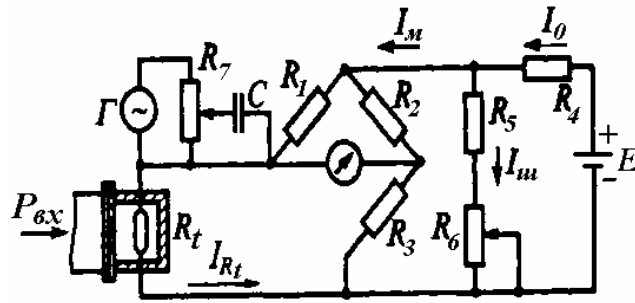


Рис. 2.23. Схема уравновешенного моста с терморезистором

Терморезистор  $R_t$ , находящийся в измерительной головке, включают в одно из плеч моста. Остальными плечами моста являются резисторы  $R_1, R_2, R_3$ , равные по величине  $R_{t0}$  — сопротивлению терморезистора в рабочей точке. Напряжение питания  $E$  на мост подается через резистор  $R_4$ , сопротивление которого велико и поэтому через него протекает достаточно малый ток питания  $I_0$ . Параллельно мосту включен делитель из сопротивлений  $R_5, R_6$ . Резистор  $R_6$  представляет собой реостат, с движком которого связана измерительная шкала (на рис. 2.23 не показана); через этот резистор протекает  $I_{ш}$ , отсчитываемый по шкале. От сопротивления резистора  $R_6$  зависит ток  $I_{Rt}$ , протекающий через терморезистор: поскольку ток питания моста  $I_m = I_0 - I_{ш}$ , то когда мост уравновешен, ток  $I_{Rt} = 0,5 I_m$ .

До подачи мощности СВЧ мост сбалансирован за счет двух источников питания: постоянного тока и переменного тока генератора. При этом положение движка резистора  $R_6$  такое, чтобы сопротивление  $R_6$  было максимальным, если используется термистор, или минимальным, если используется болометр. При подаче СВЧ-колебания баланс моста нарушается, и его восстанавливают, изменяя ток питания моста (а следовательно, и терморезистора) с помощью сопротивления  $R_6$  и источника питания  $E$ . Для термисторов нужно увеличивать шунтирующее действие, т.е. уменьшать сопротивление  $R_6$ , а для болометров наоборот. Как правило, шкала движка  $R_6$  градуируется непосредственно в ваттах.

Начальная балансировка моста переменным напряжением генератора  $G$  позволяет исключить влияние температуры окружающей среды и сохранить градуировку при старении терморезисторов и их замене.

Промышленные терморезисторные ваттметры имеют общую абсолютную погрешность порядка 4...10%. Погрешности измерения таких ваттметров определяются в основном степенью согласованности нагрузки и качеством измерительной головки. Существенным недостатком термисторных и болометрических ваттметров является ограничение максимального значения измеряемой мощности. Практически стандартные термисторы способны выдержать без разрушения мощность, не превосходящую нескольких десятков милливатт.

### **Калориметрический метод измерения мощности**

Калориметрический метод измерения мощности отличается высокой точностью, является универсальным и используется во всем радиотехническом диапазоне частот, как для малых, так и для больших мощностей. Метод основан на преобразовании энергии электромагнитных колебаний, поглощаемых согласованной нагрузкой, и преобразующихся в тепло. Поглощение энергии поглотителем, составляющим основной элемент прибора, можно зарегистрировать либо непосредственно по изменению его температуры, либо косвенно как изменение объема, давления или других характеристик.

Надежные калориметрические методы отличаются обратимостью в том смысле, что с поглотителем не происходит никаких необратимых изменений и все калориметры возвращаются в свое первоначальное состояние за время установления равновесия.

Калориметрические измерители состоят из двух частей: поглощающей нагрузки и измерителя температуры. Наиболее

распространены нагрузки с проточной водой. Мощность, поглощаемая в водяной нагрузке с проточной водой, определяется по разности температур  $\Delta T$  на выходе и входе нагрузки калориметра и по скорости расхода протекающей воды  $v$ . Для определения величины уровня мощности пользуются формулой:

$$P = 4,17kG\Delta T, \quad (2.31)$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от теплоемкости жидкости (для воды  $k = 1$ );  $G$  - расход воды, т.е. объем воды, протекающей через нагрузку в единицу времени ( $G = Sv$ ,  $S$  – приведенное сечение трубопровода воды), измеренный в  $\text{см}^3/\text{с}$ ;  $\Delta T$  — разность температур на входе и выходе колориметра.

Структура построения водяной калориметрической нагрузки показана на рис. 2.24. Внутри отрезка волновода  $1$  закреплен стеклянный конус  $2$ , через который протекает вода. В основание конуса впаяны две трубки  $3$  и  $4$ . Вода входит в трубку  $4$ , а вытекает через трубку  $3$ . Заполненный водой конус представляет нагрузку с большим затуханием, нагрузка соединяется с источником измеряемой мощности соединительным фланцем. Разность температур измеряется термопарами, включенными на входе и выходе воды в нагрузку. Термопары включены встречно, так, что индикаторный прибор фиксирует разность температур. Как уже говорилось, калориметрический метод самый точный. Погрешности образцовых калориметров составляют около 1%, а промышленные калориметры обеспечивают погрешность 2,5...5%.

Погрешность определения расхода является одной из составляющих погрешности определения мощности. Значительная часть погрешности

также обусловлена потерями тепла в калориметре, не приводящими к дополнительному изменению температуры жидкости. В частности, такие

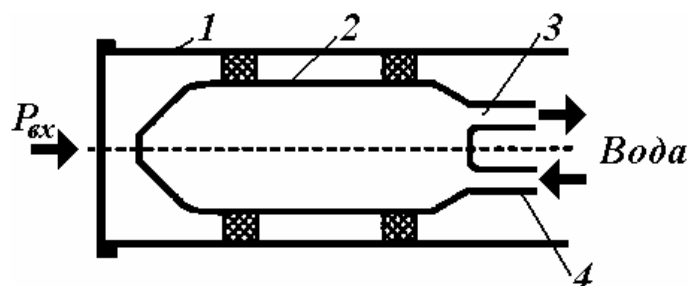


Рис. 2.24. Водяная поглощающая нагрузка калориметрического ваттметра

потери вызваны охлаждением воды в трубке за счет конвекции и теплопроводности в местах контакта трубки с волноводом. Эта составляющая увеличивается с ростом температуры жидкости в калориметре.

Составляющую погрешности, обусловленную потерями тепла, можно существенно уменьшить, если измерять мощность методом замещения. Для этого в калориметр вводят нагреватель, на который может подаваться известная мощность от источника постоянного тока или переменного тока низкой частоты. При заданном постоянном расходе сначала градуируют шкалу магнитоэлектрического измерительного прибора по известной мощности подогрева, а затем источник подогрева отключают и измеряют мощность СВЧ. Потери тепла при калибровке и во время измерений близки, поэтому погрешность уменьшается.

Неудобства, связанные с необходимостью калибровки, можно обойти, если использовать балансную схему с двумя калориметрами (см. рис. 2.25). При этом на один из калориметров, называемый опорным, подается известная мощность подогрева.



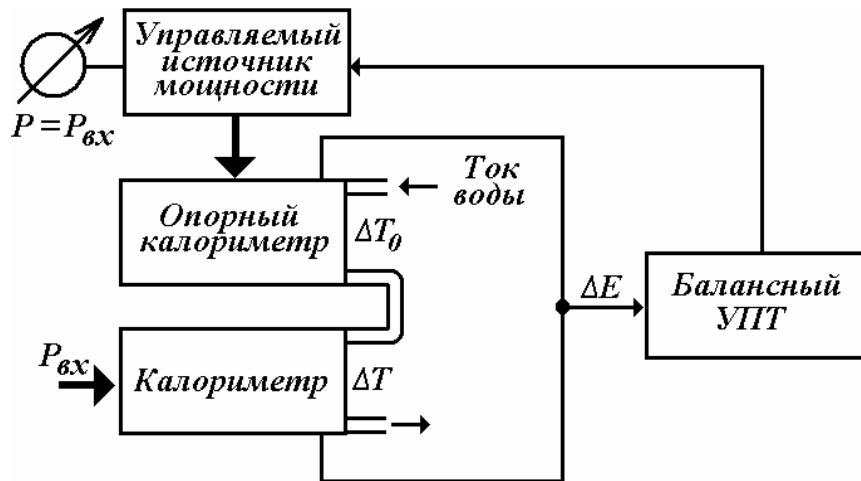


Рис. 2.25. Балансная схема включения калориметра

Рабочая жидкость протекает последовательно сначала через опорный, а затем через основной калориметры. Приращения температуры  $\Delta T$  и  $\Delta T_0$  в калориметрах преобразуют в напряжения, разность которых  $\Delta E$  поступает на балансный усилитель постоянного тока (УИТ). Выходное напряжение УИТ воздействует на управляемый источник мощности, питающий опорный калориметр. Схема авторегулирования стремится свести  $\Delta E$  к нулю, и тем самым поддерживает мощность управляемого источника примерно равной мощности  $P_{вх}$ .

## 2.5. Измерение импеданса

### 2.5.1. Понятие импеданса

Любой проводник обладает индуктивностью  $L$ . Единицы измерения индуктивности Генри (Гн). Принято говорить об индуктивности, как об эквивалентном параметре электрического двухполюсника. Индуктивность двухполюсника является коэффициентом пропорциональности между напряжением на его зажимах и скоростью изменения тока, протекающего через него:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}. \quad (2.32)$$

В общем случае индуктивность – это параметр индуктивных элементов двухполюсника, например, отрезков проводов, петель и колец из них и катушек из изолированного провода, называемых обобщенно катушками индуктивности. Например, тонкий провод длиной 5 см имеет индуктивность порядка 100 нГн. Действие катушек индуктивности обусловлено созданием вокруг провода магнитного поля и появлением на индуктивности переменного напряжения при воздействии внешних переменных магнитных полей. Взаимодействие нескольких катушек характеризуется взаимной индуктивностью.

Катушки индуктивности, выпускаемые промышленностью, имеют широкий диапазон номиналов и вариантов конструктивного исполнения. Они могут содержать от нескольких витков провода на диэлектрическом каркасе до сотен и тысяч витков на сердечнике из феррита или стальных пластин. Однако в экспериментальной деятельности часто приходится самостоятельно изготавливать катушки индуктивности и тогда становится необходимым измерение индуктивности с достаточно малой погрешностью. Как правило, при эксплуатации катушки индуктивности можно считать линейным элементом цепи, за исключением случаев катушек с магнитным сердечником.

Если подать на катушку скачкообразное изменение напряжения величиной  $E$ , то ток в ней будет расти со временем линейно и скорость согласно (2.27) будет вычисляться как:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{E}{L}. \quad (2.33)$$

Это свойство катушек используется при создании генераторов пилообразного тока и в магнитных отклоняющих системах, например

генератор развертки в кинескопе. Однако в случае, когда последовательно с индуктивностью включено сопротивление  $R$ , нарастание тока будет экспоненциальным с постоянной времени  $L/R$ . В первом приближении линейной будет только начальная часть кривой  $i(t)$ .

Электрическая емкость также является неотъемлемой частью любой системы проводников, следовательно любой двухполюсник обязательно наделен емкостью. Емкость измеряется в фарадах (Ф).

Традиционно устройства для создания требуемой емкости (конденсаторы) используются как готовые промышленные изделия. Конденсатор является устройством, служащим для накопления электрического заряда. Его емкость  $C=Q/U$  является мерой накопленного заряда  $Q$  при заданном напряжении  $U$ . Для линейной емкости справедливо выражение:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}. \quad (2.34)$$

Если проинтегрировать это выражение, то при условии постоянства тока  $I$  можно получить выражение, описывающее линейную зависимость напряжения на конденсаторе от времени:

$$u(t) = u(0) + \frac{I}{C} t. \quad (2.35)$$

Это свойство конденсаторов положено в основу создания генераторов развертки осциллографов и других приборов с электростатической системой отклонения. Если параллельно  $C$  включено сопротивление  $R$ , то напряжение и заряд конденсатора будут меняться экспоненциально с постоянной времени  $RC$ . Начальная часть этого процесса в первом приближении будет линейной.

Существует ряд способов измерения емкости. Например, подавая на конденсатор прямоугольные импульсы напряжения можно измерять средний ток зарядки и разрядки конденсатора, который будет пропорционален его емкости. Такой способ применим для емкостей, превышающих десятки пикофарад. Для меньших емкостей практикуется мостовые и резонансные измерения на переменном токе.

Неидеальность конденсаторов и катушек индуктивности учитывается эквивалентными схемами. Обычно различают две эквивалентные схемы двухполюсника: последовательную и параллельную. Соответственно параметры этих схем снабжаются индексами *s* (serial) и *p* (parallel). Омическое сопротивление  $R_{ввод}$  вводов и конденсатора создают последовательное сопротивление, а сопротивление  $R_{диэл}$  утечки изолятора создает параллельное сопротивление. Аналогично, сопротивление провода катушки индуктивности создает последовательное сопротивление, а потери в сердечнике – параллельное сопротивление  $R_{магн}$ . Рисунок 2.26 иллюстрирует преобразование этих параметров к последовательной схеме для индуктивности и параллельной для конденсатора.

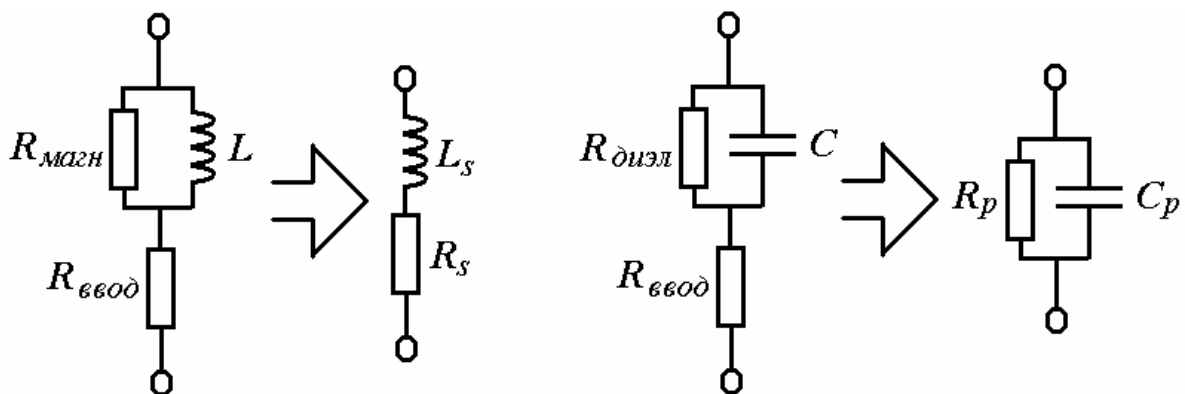


Рис. 2.26. Преобразование эквивалентных схем

На высоких и сверхвысоких частотах эквивалентные схемы приходится значительно усложнять. Например, для индуктивности

необходимо учитывать паразитную емкость монтажа и межвитковую емкость, а для конденсатора – индуктивность вводов. В диапазоне ВЧ и СВЧ параметры цепей становятся распределенными и тогда необходимо применять резонансные методы, реализованные в некоторых измерительных приборах, например  $Q$ -метрах.

Всякий двухполюсник может быть охарактеризован полным сопротивлением  $Z$ . Чаще применяется термин импеданс. Это величина, равная отношению комплексного напряжения на двухполюснике к комплексному току, протекающему через него:

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + jX, \quad (2.36)$$

где  $R$  – активная составляющая импеданса,  $X$  – реактивная составляющая,  $j$  – мнимая единица. В случае идеального резистивного двухполюсника величина  $Z = R$  действительная, в случае идеального конденсатора  $Z = jX_C$  или катушки  $Z = jX_L$  – мнимая.

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, X_L = \omega L, \quad (2.37)$$

где  $\omega$  – угловая частота.

Часто вводится понятие модуля импеданса:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, R = |Z| \cos \theta, X = |Z| \sin \theta, \quad (2.38)$$

где  $\theta$  – фазовый сдвиг между напряжением и током.

Поскольку все компоненты импеданса двухполюсника зависят от частоты, она становится первостепенным параметром измерений.

Важное значение имеют еще два параметра – тангенс угла потерь

$D = \operatorname{tg} \delta$  и обратная ему величина – добротность  $Q$ . Для последовательной схемы замещения они определяются выражениями:

$$Q_L = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{X_S}{R_S} = \frac{\omega L}{R_S}, Q_C = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{X_S}{R_S} = \frac{1}{\omega C R_S}. \quad (2.39)$$

Аналогично для параллельной схемы замещения:

$$Q_L = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{X_P}{R_P} = \frac{R_P}{\omega L}, Q_C = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{X_P}{R_P} = \omega C R_P. \quad (2.40)$$

Тангенс угла потерь обычно применяется для описания неидеальности конденсаторов, а добротность – для катушек индуктивности, но в принципе оба параметра применимы к любому двухполюснику.

### 2.5.2. Мостовые методы измерения импеданса.

Для измерения  $R, L, C$  широко применяют методы, основанные на свойствах мостовых схем. Упрощенная схема измерителя импеданса с четырехплечим мостом показана на рис. 2.27, а. К диагонали моста подведено синусоидальное напряжение от генератора. Индикатор регистрирует напряжение, возникающее в другой диагонали моста. Неизвестный импеданс включают в одно из плеч, а затем мост балансируют, изменяя сопротивление остальных плеч. Состояние баланса соответствует нулевому показанию индикатора. Условием этого является:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3. \quad (2.41)$$

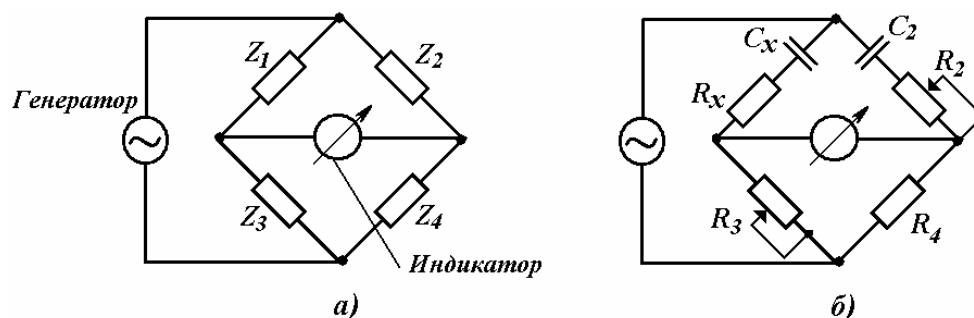


Рис. 2.27. Мостовые измерения импеданса

Если представить импедансы плеч в показательной форме:  $Z_1=|Z_1|exp(j\varphi_1)$ ,  $Z_2=|Z_2|exp(j\varphi_2)$ ,  $Z_3=|Z_3|exp(j\varphi_3)$ ,  $Z_4=|Z_4|exp(j\varphi_4)$  и подставить эти значения в (2.41), то получится два условия баланса плеч моста. Условия баланса амплитуд и фаз:

$$Z_1Z_4=Z_2Z_3; \quad (2.42)$$

$$\varphi_1\varphi_4=\varphi_2\varphi_3. \quad (2.43)$$

Иногда удобнее записать эти условия в алгебраической форме:

$$Re(Z_1Z_4)= Re(Z_2Z_3); \quad (2.44)$$

$$Im(Z_1Z_4)= Im(Z_2Z_3), \quad (2.45)$$

где  $Re$  – действительная часть произведения, а  $Im$  – его мнимая часть.

Для балансирования моста необходимо изменять как модуль, так и фазу, по крайней мере одного из импедансов плеч. В случае применения такой схемы осуществить отдельную регулировку модуля и фазы не удастся. Балансировка проводится методом последовательных приближений: поочередно регулируют каждый из элементов до получения минимальных показаний индикатора. Минимальное количество итераций определяет сходимость моста. Сходимость зависит от сопротивлений плеч моста, а также от чувствительности индикатора. Если индикатором служит магнитоэлектрический прибор, то по отклонению стрелки можно судить только об амплитуде напряжения в диагонали. Ускорить процесс балансировки можно, если применять в качестве индикатора осциллограф. На одну пару пластин следует подавать какое-либо опорное напряжение, а на вторую пару пластин – напряжение диагонали. Это позволит судить как о модуле, так и о фазе напряжения.

### 2.5.3. Измерение параметров $L$ , $C$ с помощью автогенератора

В случае, если параметры импеданса носят ярко выраженный емкостной или индуктивный характер, для их измерения можно воспользоваться методом включения неизвестного импеданса в контур автогенератора (рис. 2.28).

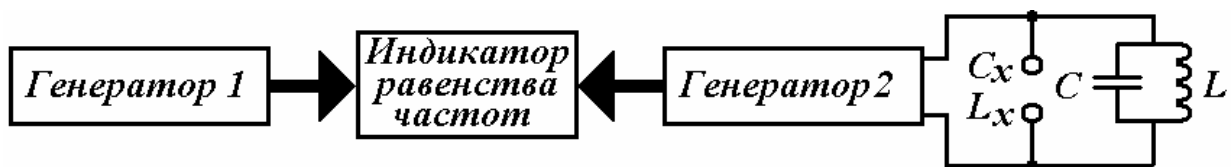


Рис. 2.28. Применение автогенератора для измерения импеданса

Генератор 1 настроен на фиксированную частоту, контур генератора 2 можно настраивать образцовым конденсатором  $C$ . Перед началом измерений частоту генератора 2 устанавливают равной частоте первого генератора. Равенство частот отслеживается индикатором. Конденсатор  $C_x$  включают параллельно конденсатору  $C$ . При этом равенство частот нарушается и его восстанавливают изменением емкости конденсатора  $C$ . Разность значений емкости конденсатора  $C$  соответствует значению емкости неизвестного конденсатора. Аналогично поступают при измерении индуктивности неизвестной катушки  $L_x$ .

### 2.5.4. Измерение добротности. Q-метр (куметр)

В основу куметра положен последовательный колебательный контур, состоящий из переменного образцового конденсатора  $C$  и образцовой катушки индуктивности  $L_0$ . Измеряемая катушка вводится вместо образцовой, а неизвестный конденсатор подключается параллельно образцовому. Настройка контура в резонанс осуществляется изменением емкости образцового конденсатора.



На рис. 2.29, а приведена упрощенная схема куметра. Источник напряжения  $E$  с емкостным выходным сопротивлением, определяемым эквивалентной емкостью  $C_{\bar{b}}$  питает последовательный контур. Напряжение на конденсаторе при резонансе максимально.

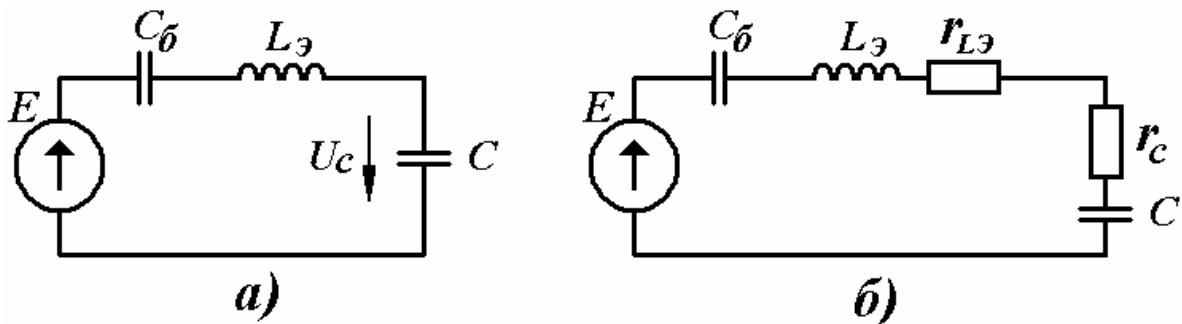


Рис. 2.29. Упрощенная схема куметра.

Для измерения добротности катушки индуктивности с эквивалентными параметрами  $L_{\bar{э}}$  и  $r_{L\bar{э}}$ , катушку включают в цепь, как показано на рисунке 2.29, б. Емкость контура  $C_k$  определяется параллельно соединенными конденсаторами  $C_{\bar{b}}$  и  $C$ , причем как правило выполняется условие  $C_{\bar{b}} \gg C$ , поэтому:

$$C_{кр} = C \left( 1 + \frac{C}{C_{\bar{b}}} \right), \quad (2.46)$$

При резонансе емкость контура:

$$C_{кр} = C \left( 1 + \frac{C_p}{C_{\bar{b}}} \right). \quad (2.47)$$

где  $C_p$  – емкость образцового конденсатора при резонансе. Если  $r_c \ll r_{L\bar{э}}$ , то ток контура при резонансе примерно равен  $E$ , а напряжение на конденсаторе:

$$U_{cp} = \frac{E}{r_{L\bar{э}} \omega C_p}. \quad (2.45)$$

Измеренное значение добротности отсчитывается на шкале вольтметра, так как значение напряжения вводимого в контур величина постоянная.

$$Q_L = \frac{U_{cp}}{E} U_{cp} = \frac{1}{r_{L3} \omega C_p}. \quad (2.49)$$

### 2.5.5. Современные анализаторы импеданса

Высокоточное измерение импеданса - задача, которую решают ученые и инженеры на протяжении нескольких веков. На современном этапе актуальность этой задачи не снижается. Только под высокой точностью измерения уже понимается погрешность не в несколько процентов или даже в десятые доли процента, а погрешность в сотые доли процента.

Ведущие мировые фирмы, которые специализируются на разработке и производстве измерителей импеданса, уверенно чувствуют себя на рынке измерительных приборов и постоянно расширяют номенклатуру выпускаемых RLC-метров, совершенствуя их метрологические параметры и функциональные возможности. На сегодня известно более 30 фирм, ведущих исследования и разработки в рассматриваемой области. Большинство фирм сегодня специализируется на выпуске аппаратуры класса 0,1 и лишь немногие создают аппаратуру более высокого класса точности.

Рассмотрим характеристики некоторых моделей RLC-метров ведущих мировых производителей.

Одним из лидеров в разработке и производстве прецизионных RLC метров является фирма QuadTech Inc., США, которая была создана в 1991 г. на основе приборостроительного департамента фирмы GenRed. Наиболее близкими для рассматриваемого класса приборов являются

производимые фирмой QuadTech прецизионный RLC-тестер (видео мост) модель 1693 и прецизионные RLC-метры серии 7000.



Рис. 2.30. RLC-тестер (видео мост) 1693 фирмы QuadTech

RLC-тестер (видео мост) 1693 является универсальным прибором, который обеспечивает широкий диапазон программируемых измерительных частот, выходных напряжений, а также выбор нескольких режимов скорости измерения при проведении испытаний электронных компонентов и материалов. Внешний вид прибора показан на рис. 2.30. Тестер измеряет 10 параметров с базовой погрешностью  $\pm 0,02\%$  в диапазоне частот от 12 Гц до 200 КГц и выходным напряжением от 5 мВ до 1.275 В, программируемого с шагом 5 мВ. Автоматический выбор предела измерения и характера измеряемого параметра, наличие интерфейса IEEE-488, а также другие метрологические и функциональные возможности модели 1693 (см. табл. 2.4) делают прибор достаточно удобным при проведении автоматического контроля.



Рис. 2.31. Прецизионный RLC-метр серии 7000 фирмы QuadTech

Серия 7000 RLC-метров фирмы QuadTech (рис. 2.31) обеспечивает проведение измерений более 10 параметров комплексного сопротивления в широком диапазоне частот, высокую функциональную гибкость, графическое и табличное представление информации, содержит

встроенный дисковод 3.5" флоппи диска. Прибор может быть использован как для контроля электронных компонентов, так и для сложного анализа диэлектрических свойств материалов при проведении научных исследований. В серии 7000 есть две модели: модель 7400 с частотным диапазоном от 10 Гц до 500 КГц и модель 7600 с частотным диапазоном от 10 Гц до 2 МГц. По всем остальным техническим характеристикам модели сходны (см. табл. 2.4).

Приборы обеспечивают автоматический запуск измерений для проведения последовательно 6 видов испытаний с индивидуальными программами, имеют удобное пользовательское меню и возможность введения корректировки результатов измерений программным путем, могут быть откалиброваны самостоятельно оператором в автоматическом режиме с использованием калибровочного комплекта (дополнительная опция).

Модели 6430В и 6440В (рис. 2.32) - прецизионные анализаторы компонентов фирмы Wayne Kerr Electronics, Великобритания. Анализаторы обеспечивают тестирование любых пассивных компонентов с высокой разрешающей способностью. Кроме того, приборы могут быть использованы не только для автоматического контроля, но и в процессе конструирования пассивных электронных компонентов, для получения их полных характеристик. При базовой погрешности 0,02% анализаторы обеспечивают измерение 12 параметров с частотой выходного сигнала: модель 6430 - от 20 Гц до 500 КГц, модель 6440 - от 20 Гц до 3 МГц. Кроме того, обе модели позволяют измерять сопротивление постоянному току  $R_{dc}$ .

Приборы имеют четыре режима по быстродействию и обеспечивают проведение до 20 изм/с при частоте  $>100$  Гц. Наличие специального устройства (дополнительная опция) для защиты приборов от влияния

заряда конденсаторов, а также возможность подачи постоянного напряжения смещения от специального источника (внутреннего - до 2В и внешнего - до 60В) позволяет использовать приборы при контроле параметров электролитических конденсаторов.



Рис. 2.32. Прецизионные анализаторы компонентов фирмы Wayne Kerr Electronics. Модели 6430В и 6440В

Модель 4284А, представленная на рис. 2.33, и идущая ей на смену модель нового поколения 4294А (рис. 2.34) - прецизионные RLC метры производства фирмы Agilent Technologies Inc., США. Фирма была образована в 1999 г. в результате стратегического структурного преобразования одного из ведущих мировых приборостроительных концернов Hewlett-Packard Company.



Рис. 2.33. Прецизионный RLC-метр 4284А фирмы Agilent Technologies

Прецизионный RLC-метр 4284А предназначен для измерения параметров импеданса пассивных элементов электрических цепей, анализа

электрических свойств электротехнических материалов и полупроводников.

Прибор позволяет измерять процентные отклонения параметра по отношению к задаваемому значению, обеспечивает автоматический и ручной выбор диапазона измерения, четырехпарное подключение объекта измерения, обладает тремя режимами усреднения результата измерения.

Новый прецизионный анализатор импеданса 4294А (рис. 2.34) разработан на основе последних технологий импедансометрии и обеспечивает наилучшую комбинацию точности, быстродействия и универсальности при измерении широкого спектра измеряемых величин. Модель 4294А снабжена рядом интерфейсов, что позволяет управлять его работой от внешнего компьютера и передавать данные на внешнее запоминающее устройство. Кроме измерения пассивных параметров прибор также обеспечивает измерение постоянного напряжения и постоянного тока.

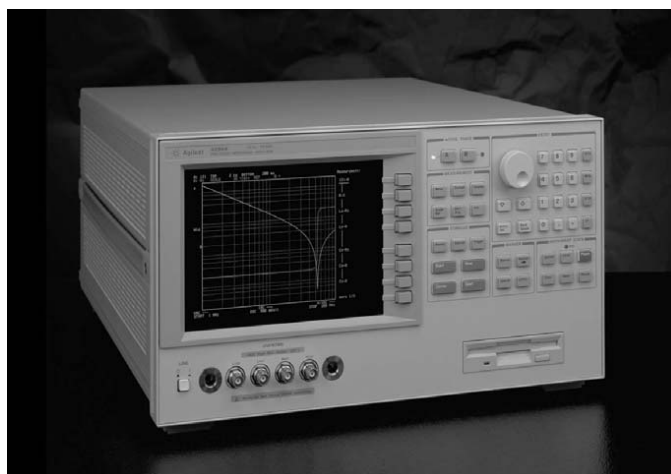


Рис. 2.34. Прецизионный анализатор импеданса 4294А  
фирмы Agilent Technologies

Следует отметить, что в качестве характеристики одного из основных метрологических параметров RLC метров в табл. 2.4 используется понятие

«базовой погрешности». Под этим понятием понимается погрешность измерения одного из основных измеряемых параметров (например, активного сопротивления  $R$  или емкости  $C$ ) на основной частоте (например, 1 кГц). При этом погрешность измерения изменяется (увеличивается) в зависимости от измеряемого параметра, диапазона измерения, значения выходного напряжения и частоты.

Таблица 2.4

Производитель	QuadTech		Wayne Kerr Electronics	Agilent Technologies	
Модель	1693	7400/7600	6430B/6440	4284A	4294A
Базовая погрешность	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02
Диапазон частот	12 кГц-200 кГц	10 Гц-500 кГц/2 МГц	20 Гц-500 кГц/3 МГц	20 Гц-1 МГц	40 Гц-110 МГц
Выходной сигнал	5 мВ-1,275 В	20 мВ-5 В	1 мВ-10 В	5 мВ-2 В	5 мВ-1 В
Измеряемые параметры	L,C,R,D,Q, $\theta$ , Y, G, X	L,C,R,D,Q, $\theta$ , Y, G, B	Z ,  Y , L, C, R, D, Q, G, B	Z ,  Y , L, C, R, D, Q, G, B	IZI, IYI, L, R, X, G, $\theta$ , L, C, D, Q
Быстродействие	До 50 изм/с	25 изм/с	2 изм/с	4 изм/с	До 300 изм/с
Источник смещения	Внутренний 2 В	Внутренний 5 В	Внутренний 2 В	Внутренний 2 В	Внутренний до 40 В
	Внешний до 60В	Внешний до 200В	Внешний до 60 В	Внешний до 40 В	
Интерфейс	IEEE-488	RS232, IEEE-488	IEEE-488	IEEE-488	IEEE-488, LAN
Габариты, мм	142x385x438	150x360x410	150x440x525	177x426x498	222x426x500
Масса, кг	6,4	8	11	15	25

Анализируя характеристики рассмотренных моделей прецизионных RLC-метров можно отметить, что к основным тенденциям в разработке и производстве подобных приборов можно отнести:

- расширение их функциональных возможностей при увеличении количества измеряемых и вычисляемых по результатам измерения пассивных параметров электрических цепей;
- ориентирование приборов на применение в составе автоматических систем контроля и управления с изменением конструктивных характеристик и расширением числа используемых интерфейсов;
- уменьшение весогабаритных характеристик RLC метров.



### **3. Осциллографические измерения**

#### **3.1. Электронно-лучевой осциллограф**

Электронно-лучевой осциллограф применяют для наблюдения формы, регистрации и измерения амплитудных и временных параметров электрических сигналов. С помощью осциллографа можно измерить частоту и длительность импульса, длительность фронта сигнала, период его повторения, сдвиг фаз между двумя сигналами, определить функциональную зависимость двух сигналов  $Y(X)$ , а также характеристик электронных ламп, транзисторов, диодов, интегральных схем, характеристик электрических и магнитных материалов и др. Осциллограф может использоваться и для исследования неэлектрических процессов, при условии преобразования их параметров в электрические сигналы.

Современные осциллографы позволяют исследовать сигналы амплитудой от долей милливольт до сотен вольт, в диапазоне частот от постоянного тока до десятков гигагерц. Погрешность измерения с помощью осциллографа составляет, как правило, 3–12%.

##### **3.1.1. Блок-схема осциллографа**

Стандартный электронно-лучевой осциллограф состоит из следующих функциональных блоков (рис. 3.1):

- электронно-лучевой трубки (ЭЛТ);
- входного делителя (аттенюатора);
- усилителя вертикального отклонения (в.о.);
- схемы синхронизации и запуска генератора развертки;
- генератора развертки (ГР);
- усилителя горизонтального отклонения (г.о.);
- калибратора амплитуды и длительности;
- блока питания.

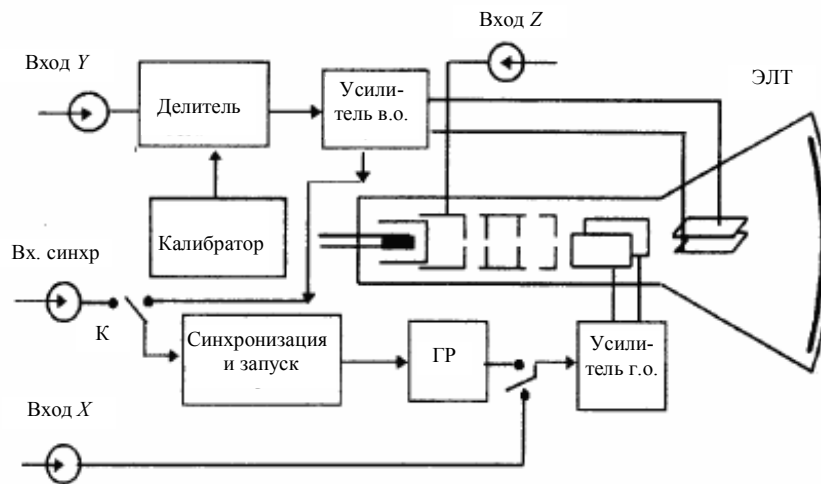


Рис. 3.1. Блок-схема электронно-лучевого осциллографа

### 3.1.2. Электронно-лучевая трубка

Основным узлом осциллографа является электронно-лучевая трубка, преобразующая электрический сигнал в видимое изображение. Электронно-лучевая трубка (рис. 3.2) представляет собой вакуумированную колбу с системой электродов, включающей нить накала  $H$ , катод  $K$ , модулятор  $M$ , первый ( $A_1$ ) и второй ( $A_2$ ) аноды и две пары пластин – вертикального  $Y$  и горизонтального  $X$  отклонения луча.

Электроны, вылетевшие из нагретого катода, попадают в поле модулятора (управляющего электрода), который находится под отрицательным потенциалом к катоду. Интенсивность пучка, выходящего за пределы модулятора, и яркость свечения пятна на экране регулируются потенциалом модулятора.

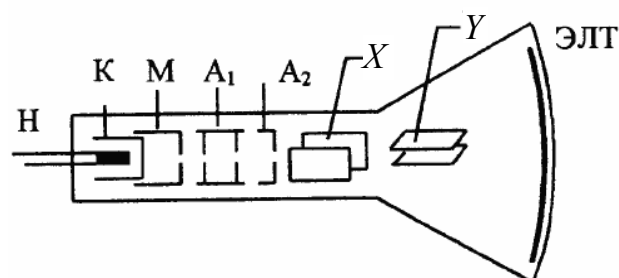


Рис. 3.2. Электронно-лучевая трубка

Дальнейшее формирование пучка происходит под действием напряжения, приложенного к двум анодам, один из которых ускоряющий, другой – фокусирующий. Система электродов (накал, катод, модулятор и аноды) образует так называемую электронную пушку, назначение которой – сформировать узкий электронный пучок (луч) необходимой интенсивности. Электронный пучок, пройдя между двумя парами взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин, попадает на люминесцентный экран, вызывая его свечение. В зависимости от типа люминофора свечение может продолжаться от нескольких микросекунд до десятков секунд.

На практике применяются одно-, двух- и многолучевые трубки, что позволяет наблюдать одновременно несколько сигналов. Существуют также запоминающие трубки, способные длительное время «хранить» на экране изображение сигнала.

Все более широкое применение получают цифровые осциллографы, способные преобразовывать исследуемый сигнал в цифровую форму, заносить его в память, а затем воспроизводить его на экране в различных режимах или вводить в ЭВМ.

### **3.1.3. Принцип получения осциллограмм**

Если к пластинам  $X$  или  $Y$  приложить разность потенциалов, то электронный луч будет отклоняться в горизонтальном или вертикальном направлении. Это отклонение  $h$  прямо пропорционально отклоняющему напряжению  $U$ , приложенному к пластинам  $h = US$ , где  $S$  – чувствительность трубки, которая, в свою очередь, зависит от конструктивных особенностей трубки и напряжения на ускоряющем аноде.

Если на вертикально отклоняющие пластины  $Y$  подать переменное напряжение, например, синусоидальной формы, то электронный луч начнет колебаться в вертикальном направлении и на экране возникает вертикальная линия. Если такое же напряжение подать только на горизонтально отклоняющие пластины  $X$ , то на экране появится светящаяся горизонтальная линия.

При одновременном воздействии переменных напряжений на обе пары пластин можно получить различные осциллограммы в зависимости от соотношения формы, фазы и частоты этих напряжений. В случае синусоидальных сигналов с одинаковыми частотами и совпадающими фазами на экране появится прямая линия (рис. 3.3, *а*), угол наклона которой зависит от отношения амплитуд. При равных частотах, но различных фазах на экране получится эллипс (рис. 3.3, *б*).

При равенстве амплитуд и сдвиге фаз, равном  $\pi/2$ , получается окружность («круговая развертка»). При сдвиге фаз большем, чем  $\pi/2$ , окружность вновь переходит в эллипс с большой осью, расположенной в других квадрантах. Измерив на осциллограмме параметры эллипса, можно определить величину сдвига по фазе между двумя сигналами.

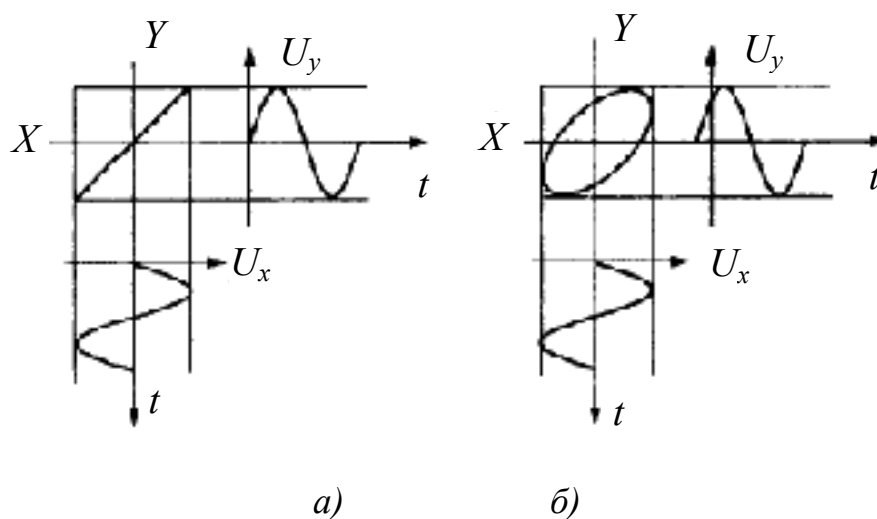


Рис. 3.3. Сложение синусоидальных сигналов

Для двух сигналов  $Y = U_Y \sin(\omega t + \varphi_1)$  и  $X = U_X \sin(\omega t + \varphi_2)$ , с амплитудами  $U_Y$  и  $U_X$ , частотой  $\omega$  и сдвигом по фазе  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  справедливо соотношение  $\sin \varphi = \frac{U_{0Y}}{U_Y} = \frac{U_{0X}}{U_X}$ , где  $U_{0Y}$  – напряжение при пересечении эллипса с осью  $Y$ , и  $U_{0X}$  – напряжение при пересечении с осью  $X$  (рис. 3.4).

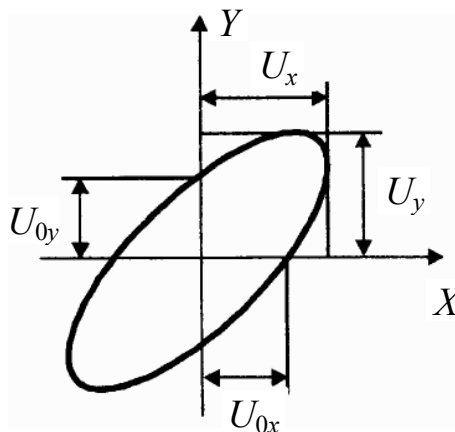


Рис. 3.4. Определение сдвига фаз по эллипсу

При других соотношениях частот и фаз получаются более сложные кривые, называемые фигурами Лиссажу (рис. 3.5).

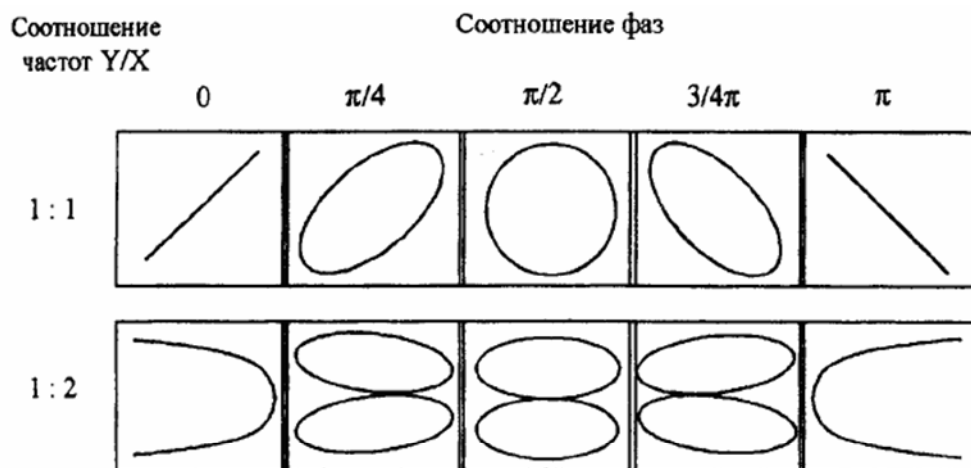


Рис. 3.5. Фигуры Лиссажу

### 3.1.4. Генератор развертки

Для получения на экране осциллографа временной зависимости сигнала, поданного на вход  $Y$ , необходимо электронный луч перемещать в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. Для этого на пластины  $X$  следует подать пилообразное напряжение (рис. 3.6), называемое напряжением развертки (оно вырабатывается специальным генератором развертки). Под действием пилообразного напряжения за время роста напряжения  $t_1$  луч переместится по горизонтали слева направо, за время спада напряжения  $t_2$  луч возвращается в исходное состояние. Таким образом, за время  $T = t_1 + t_2$ , называемое периодом развертки, луч осуществит прямой и обратный ход. Пилообразное напряжение формируется так, чтобы  $t_1 \gg t_2$ , т.е.  $T = t_1$ .

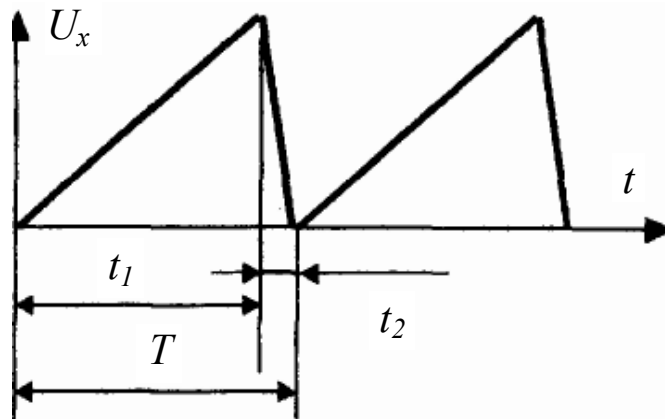
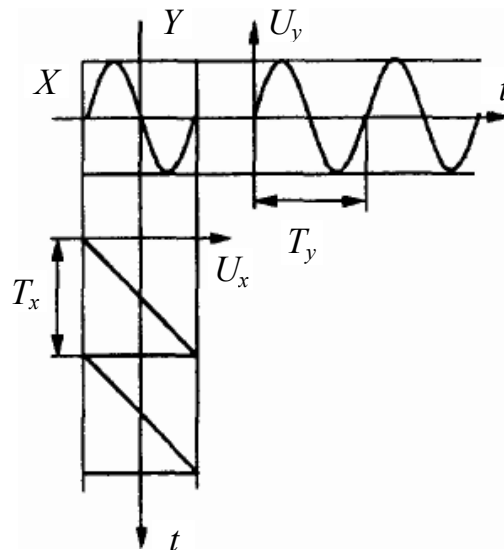


Рис. 3.6. Пилообразное напряжение развертки

Из-за большой скорости и специального гашения запирающим напряжением обратный ход луча обычно не просматривается.

Поскольку напряжение на пластинах  $X$  возрастает пропорционально времени, то ось  $X$  можно отождествить с осью времени.



### 3.7. Развертка синусоидального сигнала во времени

Если во время развертки к вертикально отклоняющим пластинам  $Y$  приложить исследуемое напряжение, то положение луча в каждый момент времени будет однозначно соответствовать значению этого напряжения, и на экране осциллографа будет виден участок исследуемого сигнала (рис. 3.7). Затем напряжение пилы резко падает до нуля, и луч возвращается в исходное положение. При следующем периоде пилы на экране появится новый участок исследуемого сигнала.

Очевидно, что при равенстве периодов исследуемого напряжения  $T_y$  и развертки  $T_r$  на экране получится один период исследуемого сигнала. При  $T_r = nT_y$  ( $n$  – целое число) осциллограмма будет представлять собой неподвижную кривую из  $n$ -периодов исследуемого напряжения. При небольших отклонениях от этого условия осциллограмма будет двигаться вдоль оси  $X$ . Возникнет эффект бегущего изображения или же экран будет заполнен семейством сдвинутых относительно друг друга кривых. Устойчивость изображения достигается при помощи схемы синхронизации.

Пилообразное напряжение, формируемое генератором развертки, должно иметь:

- высокую линейность участка, создающего прямой ход луча;
- большую крутизну участка, вызывающего обратный ход луча;
- амплитуду, достаточную для отклонения луча на весь экран;
- длительность развертки, которая должна регулироваться в широких

пределах.

Для удобства измерений в генераторе развертки предусмотрено ступенчатое переключение длительности развертки и плавная регулировка в пределах каждой ступени.

Генератор развертки может работать в двух режимах: *автоколебательном (непрерывном)* и *ждущем*.

В *непрерывном* режиме запуск генератора развертки происходит автоматически, при этом луч совершает по экрану периодическое движение с определенной скоростью. Непрерывная развертка используется при исследовании непрерывных периодических процессов или периодической последовательности импульсов небольшой скважности (скважность  $Q$  есть отношение периода  $T$  сигнала к его длительности  $\tau$ ,  $Q = T/\tau$ ).

Для наблюдения импульсных сигналов большой скважности и непериодических (одиночных) импульсов используется *ждущая* развертка.

В этом режиме запуск генератора развертки происходит лишь при поступлении специального импульса, вырабатываемого схемой синхронизации и запуска. При этом генерируется *только один* период пилы, после чего генератор развертки «ждет» прихода очередного запускающего импульса от блока синхронизации.



Кроме внутреннего генератора развертку луча можно осуществлять внешним источником, сигнал которого подается на вход  $X$  осциллографа. Переключатель рода работы генератора развертки в этом случае ставится в положение  $X$ .

### **3.1.5. Блок синхронизации**

Как указывалось выше, при несовпадении периодов исследуемого сигнала и развертки осциллограмма будет перемещаться по экрану. Для устранения этого недостатка в осциллографе предусмотрен блок синхронизации.

*Синхронизация* – процесс, при котором работа генератора развертки становится зависимой от исследуемого сигнала.

Режим синхронизации может быть *внутренним* и *внешним*. При работе осциллографа в режиме *внутренней* синхронизации из канала вертикального отклонения снимается часть усиленного исследуемого сигнала и подается на вход схемы синхронизации. Эта схема совместно со схемой запуска генератора развертки вырабатывает короткие импульсы определенной формы, полярности и амплитуды.

Запускающие импульсы формируются в тот момент, когда напряжение на входе блока синхронизации достигает определенной величины. Эта величина выбирается регулятором «уровень синхронизации». Полярность синхронизации определяет, какой участок синхронизирующего сигнала используется при формировании импульсов запуска: положительный (+), как на рис. 3.8, или отрицательный (–).

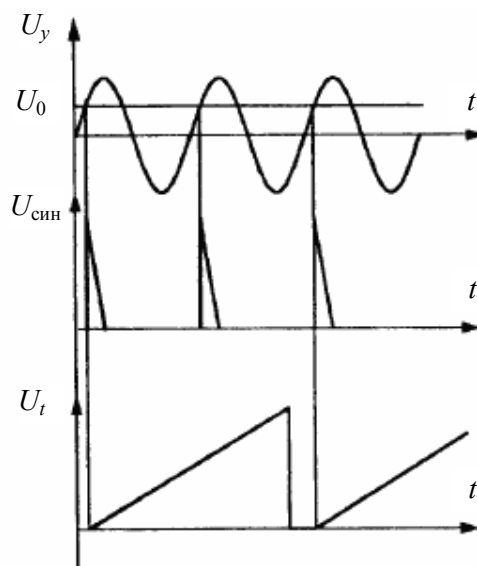


Рис. 3.8. Синхронизация генератора развертки:

$U_y$  – исследуемый сигнал;  $U_0$  – уровень синхронизации;

$U_{\text{син}}$  – синхроимпульс;  $U_r$  – напряжение развертки

При этом анализироваться может абсолютный уровень сигнала (т.е. обе его составляющие – переменная и постоянная) или только амплитуда его переменной составляющей. Эти режимы работы блока синхронизации аналогичны работе усилителя вертикального отклонения с «открытым» и «закрытым» входом, о чем речь пойдет далее.

При работе в режиме *внешней* синхронизации сигнал, управляющий запуском генератора развертки, подается извне.

### 3.1.6. Усилитель вертикального отклонения

Чувствительность трубки довольно низкая (в лучшем случае несколько вольт на 1 см), поэтому для наблюдения слабых сигналов необходимо использовать усилители. Не останавливаясь подробно на принципах работы усилителя, назовем лишь некоторые важнейшие его параметры, необходимые при работе с осциллографом.

Входное сопротивление – общее сопротивление делителя, который присоединен непосредственно к входному разъему осциллографа. Можно считать, что подключение осциллографа эквивалентно включению в соответствующие точки схемы сопротивления  $R_{вх}$ . Как правило,  $R_{вх} > 1$  МОм.

Предельная чувствительность показывает, какой минимальный сигнал может быть зарегистрирован осциллографом.

Частотная характеристика (полоса пропускания) – основная динамическая характеристика, показывающая, в каком диапазоне частот удастся наблюдать синусоидальные сигналы без существенных искажений.

Полосой пропускания усилителя называют диапазон частот от  $f_H$  до  $f_B$ , в пределах которого коэффициент передачи сигнала изменяется не более чем на 30% (рис. 3.9).

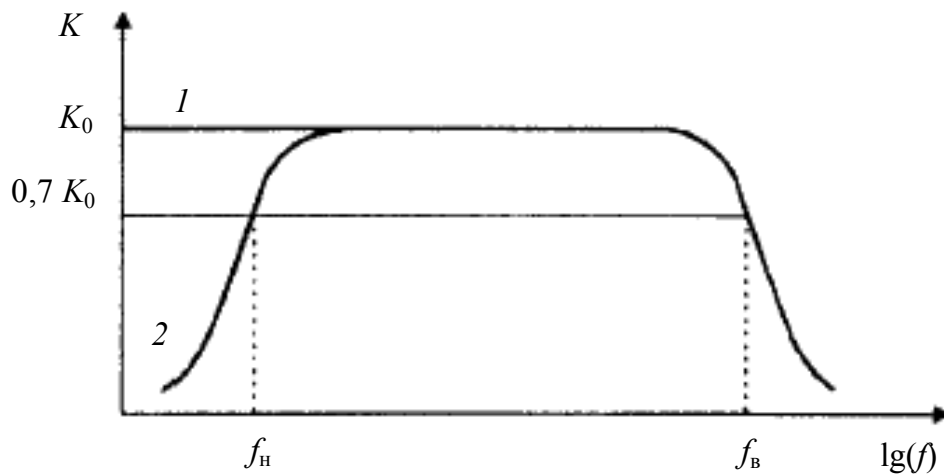


Рис. 3.9. Полоса пропускания усилителя:

$1$  – с «открытым» входом;  $2$  – с «закрытым» входом;  
 $K_0$  – коэффициент передачи;  $f_H$  – нижняя граница полосы пропускания;  $f_B$  – верхняя граница полосы пропускания частот

Ограниченность полосы пропускания усилителя вносит искажения при наблюдении импульсных сигналов: сглаживание переднего и заднего фронтов, появление выбросов, спад плоской части сигнала и т.д. (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Искажение прямоугольного импульса усилителем

Характер искажений сигнала зависит от его формы и длительности и различен для разных участков этого сигнала. Ограничение полосы частот сверху приводит в первую очередь к искажению фронтов (наиболее резко меняющихся участков сигнала), а снизу – к искажению плоской вершины сигнала.

Объяснить эти искажения достаточно легко, если учесть, что импульсный сигнал любой формы можно представить в виде суммы гармонических сигналов с некоторым набором амплитуд и частот. Если бы усилитель усиливал все частоты одинаково, то их сумма возросла бы ровно в то же число раз, что и каждая составляющая, и форма сигнала сохранилась бы. Однако реальные усилители имеют ограниченную полосу пропускания частот, за пределами которой коэффициент усиления заметно падает и усиленный сигнал может значительно отличаться от исходного. Таким образом, чем шире полоса усиливаемых частот, тем точнее воспроизводится сигнал.

### 3.1.7. Входная цепь

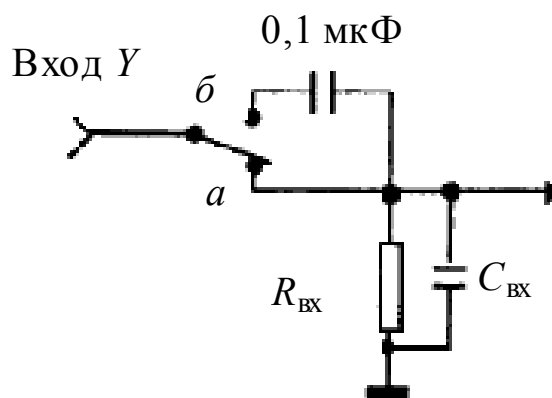


Рис. 3.11. Открытый (а) и закрытый (б) входы

Исследуемый сигнал подается на вход  $Y$  осциллографа, который имеет две схемы: *открытую* (=) и *закрытую* (~). При открытом входе (рис. 3.11, а) сигнал подается непосредственно на делитель и передается с постоянной составляющей; при закрытом входе (рис. 3.11, б) – через разделительный конденсатор и не пропускает постоянную составляющую.

### 3.1.8. Калибратор

При проведении измерений амплитудных и временных характеристик сигналов необходима калибровка масштабов по осям  $Y$  и  $X$ . Для этого в осциллографах имеется источник импульсных сигналов с известной амплитудой и длительностью, называемый калибратором. С выхода калибратора напряжение подается на вход  $Y$ , после чего проверяется соответствие амплитудных и временных параметров калибровочного сигнала положению переключателей чувствительности осциллографа по осям  $X$  и  $Y$ .

В случае несоответствия необходимо ввести коррекцию коэффициента усиления специальным сопротивлением, выведенным «под шлиц» и обозначенным значком  $Y$  по оси  $Y$  и по оси  $X$  – соответственно  $X$ .

### 3.1.9. Погрешности

В любом осциллографе погрешности измерений складываются из нескольких источников: погрешности калибровки, нелинейной зависимости отклонения луча по вертикали от входного напряжения, зависимости коэффициента усиления от частоты, погрешности входного усилителя, нелинейности развертки во времени, шумов, конечной толщины луча и т.д. Подробнее с величиной погрешностей можно ознакомиться в техническом описании конкретного осциллографа, где обычно указываются основной и расширенный диапазоны измерений и соответствующие погрешности.

### 3.1.10. Измерение напряжений

Измерение напряжений выполняется методом калиброванных шкал и методом сравнения.

#### **Метод калиброванных шкал**

Измерять напряжение сигнала можно, калибруя масштабную сетку на экране осциллографа (т.е. определяя цену деления сетки в вольтах на сантиметр). В этом случае сетка становится шкалой. Масштаб указывается на переключателе чувствительности осциллографа. При наличии ручки плавной регулировки чувствительности указанный масштаб получается лишь при **одном ее положении, фиксируемом при повороте** (это положение обычно обозначается специальной меткой у ручки). Из-за влияния ряда факторов – погрешностей калибровки, визуального отсчета, нелинейной амплитудной характеристики канала горизонтального отклонения и так далее – этот метод дает погрешность измерения напряжения около 5%.

Погрешность отсчета включает в себя две составляющие: погрешность совмещения линий осциллограммы с линиями шкалы и погрешность отсчета из-за конечной ширины линии. Погрешность совмещения принимается равной  $b/5$ , погрешность отсчета -  $b/3$  ( $b$  -

ширина луча). Поскольку они независимы, то относительная погрешность отсчета составляет:

$$\sigma_{отн} = \frac{1}{H} \sqrt{\left(\frac{b}{5}\right)^2 + \left(\frac{b}{3}\right)^2} \approx 0.4 \frac{b}{H},$$

где  $H$  – размер измеряемого участка изображения на экране. Относительная погрешность уменьшается с увеличением размеров изображения  $H$ . Поэтому, **чтобы погрешность измерения была минимальна, изображение измеряемой части исследуемого сигнала должно занимать 80-90% рабочей площади экрана.**

Нелинейность амплитудной (и частотной) характеристики приводит к тому, что сигналы различной амплитуды (частоты) усиливаются по-разному. Значит, необходимо подбирать для работы осциллографа, для которых измеряемые значения величин будут лежать в диапазонах, рекомендованных для работы осциллографа, более того, ближе к середине диапазона – далеко от крайних значений. Наблюдать сигнал можно и при минимальной (для данного осциллографа) амплитуде, но при измерении напряжения погрешность будет значительно больше 5% (аналогично и для частот). На экране многих осциллографов есть две пунктирные горизонтальные линии, которые ограничивают область, в которой амплитудная характеристика линейна и гарантируется указанная в описании точность измерения напряжений.

### **Метод сравнения**

Этот метод позволяет увеличить точность измерений за счет исключения погрешностей, связанных с нелинейностью амплитудной характеристики, геометрическими искажениями ЭЛТ. Осциллограф используется лишь как устройство сравнения исследуемого сигнала с эталонным, а изображение - как индикатор сравнения.

### **Метод замещения**

Сначала получают на экране осциллографа изображение исследуемого сигнала. Затем, вместо этого сигнала подают на вход  $Y$  образцовое напряжение (усиление  $Y$  не изменять!). Регулируя его величину, добиваются картинки сигнала с той же амплитудой. Погрешность измерения определяется погрешностью образцового напряжения, неравномерностью переходной характеристики (если сигналы имеют разные формы и частоты) и погрешностью совмещения линий. Благодаря этому метод замещения позволяет обеспечить погрешность не хуже 1-2%.

**Компенсационный метод** обеспечивает компенсацию исследуемого сигнала с помощью образцового (постоянного) напряжения, подаваемого на вход "Y" в сумме с исследуемым сигналом. Регулируя образцовое напряжение, обеспечивают смещение положения импульса до тех пор, пока его вершина не совместится с основанием исходного импульса. Погрешность метода определяется аналогично предыдущему методу.

### **3.2. Цифровой осциллограф**

Познакомимся с устройством и особенностями работы цифрового осциллографа на примере четырех лучевого осциллографа TDS-2024. На рис. 3.12 представлена его структурная схема. Исследуемый сигнал поступает на вход усилителя (усилителя А или усилителя Б), далее преобразуется в цифровой код аналого-цифровым преобразователем (АЦП), и в цифровом виде запоминается блоком памяти (ЗУ). Информация из памяти может быть «высвечена» в виде привычной осциллограммы на дисплее прибора (дисплей ЭЛТ). Имеется возможность независимого масштабирования по амплитуде и времени, что позволяет выводить на



экран как весь записанный в память сигнал, так и отдельные временные фрагменты.

С помощью системы маркеров на дисплей осциллографа выводятся численные значения времени и напряжения в выбранных на экране точках осциллограммы. Всеми узлами прибора управляет встроенная ЭВМ (микропроцессор).

Цифровой осциллограф кроме штатных сервисных удобств электронно-лучевых осциллографов (ждуший запуск, внешняя синхронизация, задержка запуска, многоканальность и т.д.) имеет свои, присущие только ему, возможности: цифровой отсчет и неограниченное время хранения информации, одновременное расположение в памяти нескольких осциллограмм, программное управление и возможность математической обработки полученных данных внешними ЭВМ и т.п.

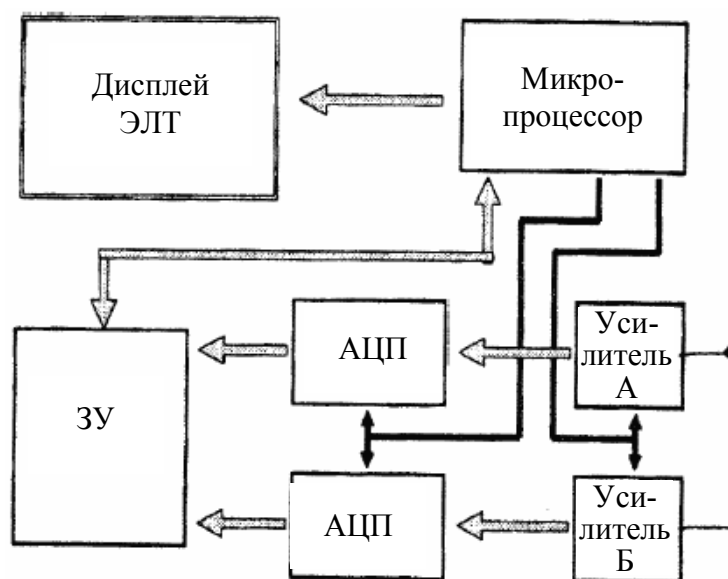


Рис. 3.12. Блок-схема цифрового осциллографа

В частности, одним из пользовательских удобств является так называемая «антизадержка» (или опережение), т.е. развертку осциллографа по внешнему запуску (или в ждущем режиме) можно как бы запустить за

некоторое время до прихода запуска. Такой «прием» осуществляется благодаря возможности циклической непрерывной записи поступающих данных в память осциллографа, и сигнал запуска является в действительности сигналом «стоп» с определенной задержкой. Поясним это несколько подробнее. Если для записи данных в цифровом осциллографе имеется  $M$  ячеек памяти (С9-8 содержит 2048 ячеек памяти), а время между отдельными измерениями при оцифровке сигнала  $t$  (период дискретизации АЦП), то можно запомнить осциллограмму длительностью до  $Mt$ . В режиме непрерывной циклической записи поступающая информация записывается вначале в ячейку  $N1$ , затем в  $N2$ , далее в  $N3$ ... в  $N(m - 1)$ , в  $Nm$ ; затем снова в  $N1$ , далее в  $N2$  и так далее, пока включен этот режим. Следовательно, при непрерывной циклической записи в любой момент времени  $T$  в памяти находится осциллограмма сигнала, последовательно от момента времени  $(T - Mt)$  до  $T$ . Антязадержка запуска реализуется следующим образом. При включении осциллографа в ждущем режиме включается непрерывная циклическая запись в память оцифрованных входных напряжений с установленными интервалами дискретизации  $t$  и ожидается синхроимпульс для «запуска» развертки. После прихода импульса синхронизации в момент времени  $T_0$  можно продолжить запись в течение  $t_{\text{раз}} (t_{\text{раз}} < Mt)$ , при этом в памяти прибора окажется осциллограмма от момента времени  $T_0 - (Mt - t_{\text{раз}})$  до  $T_0 + T_{\text{раз}}$ , т.е. реализуется опережение запуска развертки по отношению к моменту прихода синхроимпульса  $T_0$  на величину  $(Mt - t_{\text{раз}})$ . Отметим, что в осциллографах выбирается требуемое опережение  $-t_0$ , а длительность развертки подсчитывается автоматически  $t_{\text{раз}} = Mt - t_0$ . Наличие опережения позволяет фиксировать физические величины с «предысторией», делает более удобным изучение процессов с сигналом запуска как следствием интересующих явлений. Например, при изучении электрических пробоев, различных взрывов и тому подобного интересует начальный момент развития процесса, в это время все

изменения очень малы и могут возникнуть проблемы с устойчивой синхронизацией запуска осциллографа. Используя в качестве синхроимпульса развившийся процесс (пробой, взрыв и т.п.), выбрав подходящее опережение, можно уверенно фиксировать зарождение процессов, фронты импульсов и т.д.

## **4. Вакуумная техника**

### **4.1. Общие сведения**

Вакуумные технологии относятся к спектру базовых технологий. Сфера современного применения вакуумных технологий непрерывно расширяется. Их применение в научных изысканиях, а также отраслях промышленности, связанных с применением вакуума в технологических процессах, возрастает по мере расширения спектра исследований и совершенствования процессов производства с целью повышения требований к качеству выпускаемой продукции.

#### **Процессы, сопровождающие получение вакуума**

##### **Общие сведения**

Вакуум – газовая среда, находящаяся при давлениях, значительно ниже атмосферного.

Свойства газов при низких давлениях описываются молекулярно-кинетической теорией газов, основные положения которой рассмотрены в курсе общей физики.

Наиболее часто в вакуумной технике употребляются следующие единицы давления: Па ( $\text{Н/м}^2$ ), Торр, (мм. рт. ст.), атм. (физическая). Единицей давления в системе СИ является 1 Па (Паскаль), другие наиболее часто употребляемые (Торр, мм. рт. ст, атм. и др.) являются внесистемными единицами измерения. Соотношение между этими единицами представлено ниже в Табл. 4.1.

По мере уменьшения давления (плотности газа) длина свободного пробега увеличивается и при некотором значении соответствует характерному размеру вакуумного объема. В этом случае частота

столкновений молекул со стенками объема превышает частоту взаимных столкновений.

Таблица 4.1.

Единицы давления	1 Па (Н/м <sup>2</sup> )	1 Торр	1 атм. (физ.)
1 Па (1 Н/м <sup>2</sup> )	1	7,5 x 10 <sup>-3</sup>	9,87 x 10 <sup>-6</sup>
1 Торр = 1 мм рт.ст.	1,33 x 10 <sup>2</sup>	1	1,32 x 10 <sup>-3</sup>
1 атм. (физ.)	1,01 x 10 <sup>5</sup>	760	1

В таблице 4.2 приведены значения концентраций, длин свободного пробега и частот столкновений со стенкой молекул азота при температуре (T= 273 K)

Таблица 4.2.

Давление, Па	10 <sup>5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>
n, м <sup>3</sup>	2.7 10 <sup>25</sup>	2.7 10 <sup>16</sup>	2.7 10 <sup>14</sup>
v, м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	2.8 10 <sup>27</sup>	2.8 10 <sup>18</sup>	2.8 10 <sup>16</sup>
l, м	6 10 <sup>-8</sup>	60	6 10 <sup>3</sup>

Из приведенных данных видно, что при постоянной температуре средняя длина свободного пробега обратно пропорциональна давлению.

### Понятие о степенях вакуума

Уменьшение молекулярной концентрации газа (давления) в выделенном объеме с помощью разнообразных устройств приводит к изменению интенсивности протекания физико-химических процессов,

которые напрямую зависят от отношения числа столкновений молекул со стенками к числу их взаимных столкновений, так называемое число Кнудсена, которое положено в основу условного деления вакуумных условий. В процессе откачки различают несколько степеней вакуума (рис. 4.1): низкий (от  $1 \cdot 10^5$  до 100 Па), средний (от 100 до  $1 \cdot 10^{-1}$  Па), высокий (от 0.1 до  $1 \cdot 10^{-5}$  Па) и сверхвысокий (от  $1 \cdot 10^{-5}$  и ниже).



Давление

Рис. 4.1

Исходя из определения числа Кнудсена, можно получить следующие простые критерии оценки вакуумных условий: **низкий вакуум** – это состояние газа, при котором средняя длина свободного пробега молекул ( $l$ ) меньше (значительно меньше) размеров вакуумной камеры ( $D$ ), т.е.  $l \ll D$ ; **средний вакуум** соответствует условию  $l \approx D$ , а **высокий вакуум** -  $l \gg D$ .

### Течение газа по трубопроводам и через диафрагмы

Конструкция практически любой динамической вакуумной системы содержит три основных узла: рабочий вакуумный объем, устройство, обеспечивающее его откачку, а также вакуумные трубопроводы, обеспечивающие соединение указанных узлов. Для обеспечения эффективной работы вакуумной системы все элементы, входящие в состав вакуумных установок при их соединении должны быть согласованы. В процессе откачки происходит перемещение газа по трубопроводу под действием разности давлений или температур.

Помимо таких понятий, как давление  $P$ , объем  $V$  и температура  $T$ , в вакуумной технике используются понятия: «*скорость откачки*» или «*газовый поток*», которые определяют скорость, с которой уменьшается давление в откачиваемом объеме. При начальном количестве молекул газа –  $N$ , массой –  $m$  скорость изменения массы газа в объеме:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d(Nm)}{dt} \quad (4.1)$$

Предполагая, что в процессе откачки температура не меняется, используя уравнение состояния идеального газа можно получить

$$\frac{dM}{dt} = \frac{m}{kT} \frac{d(pV)}{dt} \quad (4.2)$$

Вводя обозначение  $Q = \frac{d(pV)}{dt}$ , получим  $\frac{dM}{dt} = \frac{m}{kT} Q$ . Таким образом, массовый расход газа определяется через величину «газового потока» -  $Q$ , который измеряется в Па м<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>.

При наличии перепада давлений в канале откачки при постоянной температуре поток протекающего газа пропорционален разности давлений на концах трубопровода ( $P_1$  и  $P_2$ ):

$$Q = U(P_1 - P_2). \quad (4.3)$$

Для динамических вакуумных систем, когда выполняется условие неразрывности газового потока, можно провести аналогию между законами течения газа и законами постоянного тока (закон Ома). В этом случае разности потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) будет соответствовать разность давлений ( $p_1 - p_2$ ), электрической проводимости  $\sigma = 1/R$  - проводимость трубопровода  $U$ , а электрическому току  $I$  поток газа  $Q$ .

Коэффициент пропорциональности в (4.3)  $U$  называется **проводимостью** элемента вакуумной системы и измеряется в л/с, см<sup>3</sup>/с, м<sup>3</sup>/с. Величина обратная проводимости получила название «сопротивление трубопровода». Проводимость является коэффициентом пропорциональности между потоком и разностью давлений. Ее величина численно равна количеству газа, протекающего через вакуумный элемент при единичной разности давлений на его концах в единицу времени. В общем случае проводимость зависит от геометрии трубопровода, степени вакуума и типа газа.

В вакуумной технике различают три основных вида течения газа: вязкостный, молекулярный, а также переходной между вязкостным и молекулярным.

В вязкостном режиме течения газ можно разделить на движущиеся с различными скоростями слои, что обусловлено наличием внутреннего трения в газе (вязкость).

В молекулярном режиме взаимодействие между молекулами практически отсутствует, и в этом случае для описания движения молекул используют основные положения молекулярно-кинетической теории газов.

Переходной режим описывается в основном эмпирическими зависимостями.

В этой связи важно знать влияние геометрических факторов, а также линейных размеров трубопровода на процесс откачки при различных типах течения газа, т.е. в различных областях давлений.

Для общего понимания процессов, сопровождающих откачку дальнейшие рассуждения будут сконцентрированы в основном на



наиболее распространенных конструкциях вакуумных элементов: диафрагмы круглого сечения и цилиндрические трубопроводы.

Используя закономерности течения газа в вязкостном режиме (закон Пуазейля), и молекулярном (закон Кнудсена) при рассмотрении течения воздуха при температуре 293 К по цилиндрическому трубопроводу можно получить следующие соотношения:

$$U_{\text{вяз}} = 1.36 \cdot 10^3 \frac{D^4}{L} \frac{p_1 + p_2}{2},$$

$$U_{\text{мол}} = 121 \frac{D^3}{L},$$

где  $D$  и  $L$  выражены в м,  $p$  - Па,  $U$  - м<sup>3</sup>/с. В переходной области проводимость рассчитывается по предложенному Кнудсенем полуэмпирическому выражению:

$$U_{\text{перех}} = bU_{\text{мол}} + U_{\text{вяз}},$$

где  $b$  – коэффициент, равный 0.8 на границе вязкостного режима, 1 на границе молекулярного. Величина, равная 0,9, может быть принята как постоянное значение для технических расчетов.

На рис. 4.2 показана характерная зависимость проводимости цилиндрического трубопровода диаметром 1 м длиной 1 м от давления в нем при температуре 20 °С.

Как видно, при низком вакууме проводимость растет с повышением давления, при высоком вакууме она остается постоянной. В условиях низкого вакуума доминирует **вязкостный режим** течения газа, при котором распределение скорости потока по поперечному сечению трубопровода определяется силами внутреннего трения. В условиях

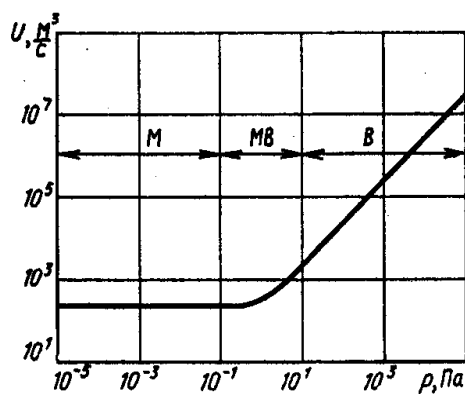


Рис. 4.2

высокого вакуума силы внутреннего трения становятся пренебрежимо малы, и имеет место **молекулярный режим** течения газа. На рис. 4.3 представлены проводимости цилиндрических трубопроводов различных размеров в условиях молекулярного течения.

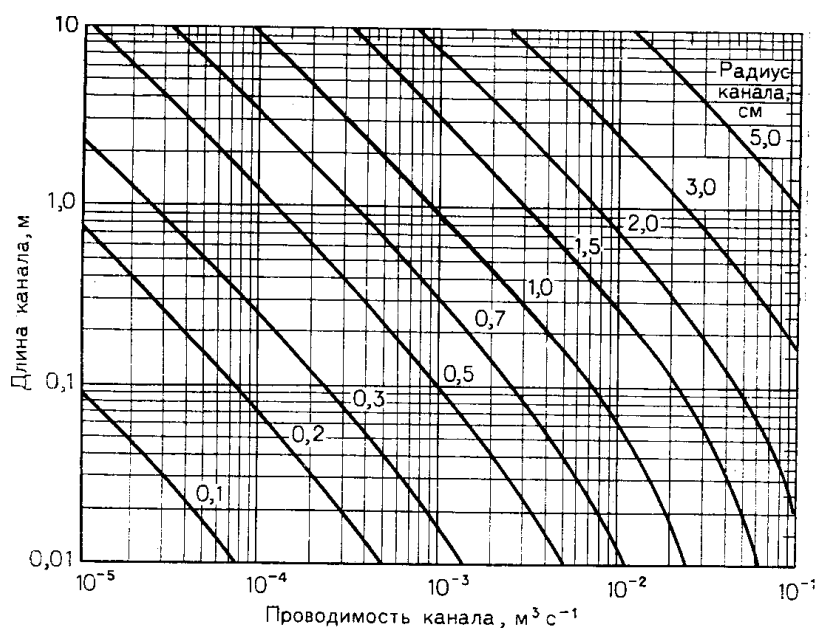


Рис. 4.3

Переходный режим течения газа называется **молекулярно-вязкостным**. Этот режим обусловлен влиянием как внутреннего трения в газе, так и молекулярным переносом.

Величина сопротивления трубопровода при неограниченном уменьшении его длины в пределе стремится к величине, равной сопротивлению входной диафрагмы, определяемой площадью поперечного сечения диафрагмы, разделяющей два вакуумных объема. Величина проводимости в данном случае определяется не только площадью сечения, а зависит также от отношения характерного размера диафрагмы к характерному размеру сосуда, примыкающему к диафрагме со стороны большего давления.

Обычно при предварительных расчетах динамических вакуумных систем отсутствуют первичные данные по перепаду давлений, в этой связи принято в качестве первого приближения для круглого отверстия определять проводимость следующим образом:

$$U_{o.взк} = 160D^2, \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{o.мол} = 91D^2, \text{ м}^3/\text{с}.$$

В самом общем случае проводимость отверстия зависит от температуры, массы молекул газа и площади отверстия.

Сопротивление изгиба трубопровода учитывается только в молекулярном режиме. В этом случае

$$U = 121 \frac{d^3}{\ell + 1,33d}.$$

Из общих физических соображений и приведенных выше аналогий следует, что проводимость параллельно и последовательно соединенных вакуумных элементов соответственно определяется выражениями:

$$U_{\Sigma} = \sum_i U_i,$$

$$U_{\Sigma} = \left( \sum_i \frac{1}{U_i} \right)^{-1}.$$

При конструировании трубопроводов вакуумной системы всегда необходимо помнить, что в случае последовательного соединения трубопроводов различной проводимости общая проводимость будет определяться участком с наименьшей проводимостью. В случае параллельного соединения общая проводимость суммируется.

### Общие характеристики откачки

Рассмотрим в общих чертах удаление газа из откачиваемого объема в динамической вакуумной системе, при этом не будем конкретизировать тип вакуумного насоса. Принципиальная схема простейшей вакуумной системы, состоящей из откачиваемого объема 1, трубопровода 2, манометрических преобразователей 3, насоса 4 и, представлена на рис. 4.4.

В установившемся режиме при постоянном расходе газа  $Q$  и неизменном давлении внутри вакуумного насоса величина

$$S_n = Q/p_2 \quad (4.4)$$

определяет откачивающую способность данного насоса – **быстрота действия вакуумного насоса** - и измеряется  $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$ . Как будет показано далее, при рассмотрении различных типов вакуумных насосов, для большинства указанный параметр практически постоянен во всем рабочем диапазоне давлений.

Трубопровод 2, соединяющий откачиваемый объем с насосом, имеет проводимость  $U$ . Исходя из уравнения (4.3), поток откачиваемого

газа  $Q$  создает перепад давления ( $p_1 - p_2$ ), где  $p_1$  - давление в камере,  $p_2$  - давление на входе насоса. Тогда поток газа в насосе можно определить

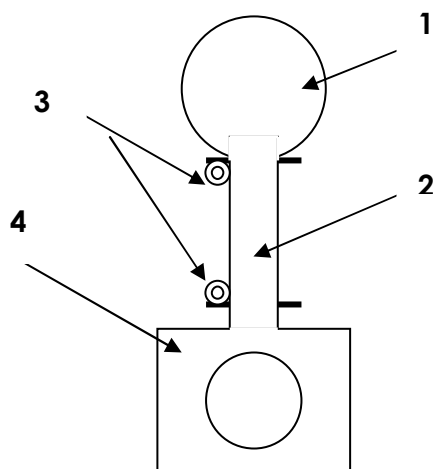


Рис. 4.4.

согласно (4.4)

$$Q = S_n p_2. \quad (4.5)$$

По аналогии с (4.4) эффективная быстрота откачки вакуумного объема

$$S_o = \frac{Q}{p_1} \quad (4.6)$$

Используя (4.3), (4.5), (4.6) легко получить основное уравнение вакуумной техники:

$$S_o = \frac{U}{\left(1 + \frac{U}{S_n}\right)}. \quad (4.7)$$

Видно, что при постоянной проводимости трубопровода  $U$ , соединяющего вакуумный объем с насосом любой производительности  $S_n$ , максимальная быстрота откачки вакуумного объема  $S_o$  не может превышать величины  $U$ .

Максимум эффективности быстроты откачки насоса может быть реализован лишь в случае непосредственного подсоединения насоса к вакуумной камере при полном согласовании входной и выходной диафрагм, когда  $U \rightarrow \infty$ .

Отношение эффективной быстроты откачки объема к скорости действия вакуумного насоса называется коэффициентом использования насоса:

$$K = \frac{S_0}{S_n}$$

Используя (4.7) можно получить, по сути, характеристику эксплуатационного качества вакуумной системы – зависимость коэффициента использования вакуумного агрегата от конструктивных особенностей ее построения ( $U$  – проводимости вакуумной арматуры и  $S_n$  – характеристики применяемого вакуумного агрегата):

$$K = \frac{U}{S_n + U} \quad (4.8)$$

Рис. 4.5 отображает функциональную зависимость -  $K(S_n, U)$ .

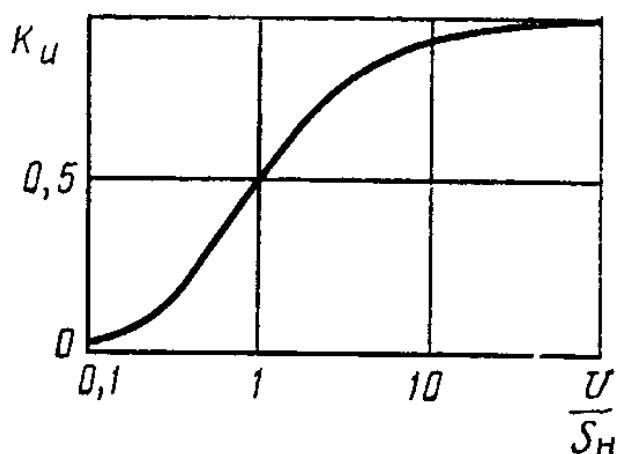


Рис 4.5

Видно, что коэффициент использования насоса существенно зависит от отношения проводимости вакуумной системы к скорости действия насоса.

Используя уравнение сохранения массы (4.1) и его вид при изотермическом процессе, можно получить, что скорость изменения массы определяется разностью скоростей потоков газов натекающих и откачиваемых из вакуумного объема:

$$Q_{\text{ex}} - Q_{\text{вых}} = d(pV)/dt. \quad (4.9)$$

Из (4.6) следует, что откачиваемый поток равен  $Q_{\text{вых}} = Sp$ . В виду того, что вакуумный объем постоянен выражение (4.8) примет вид:

$$Q_{\text{ex}} - Sp = V \frac{dp}{dt}. \quad (4.10)$$

Интегрируя выражение (4.10) при постоянстве натекания газа в вакуумный объем  $Q_{\text{ex}} = \text{const}$  можно получить:

$$p = \frac{Q_{\text{ex}}}{S} - \left( \frac{Q_{\text{ex}}}{S} - p_0 \right) \exp\left(-\frac{St}{V}\right), \quad (4.11)$$

где  $p_0$  – начальное давление в системе. Таким образом, давление в откачиваемом объеме падает по экспоненциальному закону с постоянной времени –  $V/S$ . При  $t \rightarrow \infty$  предельно достижимое давление составит

$$p_{\text{пред}} = \frac{Q_{\text{ex}}}{S}. \quad (4.12)$$

Преобразовав выражение (4.10) к виду  $dt = \frac{Vdp}{Q_{\text{ex}} - Sp}$  и проинтегрировав с учетом начальных условий, определим, что время откачки вакуумного объема от давления  $p_0$  до  $p_{\text{мин}}$  составит:

$$t = \frac{V}{S} \ln \frac{p_{\text{мин}} - \frac{Q_{\text{ex}}}{S}}{p_0 - \frac{Q_{\text{ex}}}{S}}. \quad (4.13)$$

### **Источники газа в вакуумном объеме**

Конечное давление, устанавливаемое в вакуумном объеме, в условиях динамической откачки является результатом динамического равновесия между процессом откачки газа и поступлением его в объем из атмосферы при наличии неплотностей или за счет газоотделения со стенок камеры и вакуумных элементов.

Причину газовыделения поверхностями твердых тел можно понять рассмотрев процессы взаимодействия молекул газов с поверхностями. При взаимодействии молекул газа с поверхностью она либо упруго отражается, либо удерживается некоторое время поверхностью, а затем покидает ее. Обычно на поверхности твердого тела существует слой связанных молекул. Явления, приводящие к поглощению газовых молекул поверхностью твердых тел, различаются по природе. Поглощение газовых молекул поверхностью твердых тел называется сорбцией (поглощающее тело — сорбент), обратный процесс — десорбцией. Сорбция, возникающая за счет действия сил Ван-дер-Ваальса называется физической адсорбцией, за счет химического взаимодействия — хемосорбция. Абсорбция — это поглощение газов в объеме твердых или жидких тел. Эти явления имеют большое значение в вакуумной технике. Интенсивная десорбция приводит к обильному газовыделению и сильно замедляет откачку, наоборот, активная сорбция ведет к быстрому поглощению газа и может быть использована для откачки.

В общем случае можно считать, что система газ - поверхность обладает некоторой энергией связи. Физическую адсорбцию и хемосорбцию трудно различить, но при последней возникающие связи



обычно более прочные. При физической адсорбции на поверхности существуют центры адсорбции с расстояниями порядка молекулярных размеров. В этом случае число поглощенных молекул пропорционально площади поверхности. Как правило, адсорбированные молекулы располагаются мономолекулярным слоем. Адсорбированное состояние устойчиво и соответствует минимуму потенциальной энергии молекулы. Поэтому адсорбция сопровождается выделением энергии. В свою очередь нагрев поверхности сообщает адсорбированным молекулам добавочную энергию для преодоления потенциального барьера и приводит к десорбции.

Хемосорбция сопровождается образованием валентных связей молекул газа с молекулами твердого тела. Так как реакции идут с поглощением энергии, нагрев поверхности может увеличить количество сорбированных молекул. В отличие от физической адсорбции при хемосорбции выделение поглощенного газа требует нагрева до более высоких температур. К примеру, хемосорбированный на вольфраме кислород, существенно снижающий эмиссионные свойства вольфрамового катода, десорбируется при нагреве вольфрама до 1700 °С.

#### **4.2. Типы и характеристики вакуумных насосов. Общая характеристика вакуумных насосов**

Для поддержания вакуумных условий в динамических вакуумных системах применяются различные типы вакуумных насосов, выбор которых определяется исходя из конкретных требований, предъявляемых к вакуумной системе. Вакуумные насосы подразделяются на сверхвысоковакуумные, высоковакуумные, средневакуумные и

низковакуумные, а в зависимости от принципа действия – на механические и физико-химические.

В зависимости от поставленных задач динамические вакуумные системы делятся на одноступенчатые (низковакуумные) и многоступенчатые (одновременное использование вакуумных насосов низкого и высокого разрежения).

Наиболее значимыми характеристиками вакуумных насосов являются: быстрота действия, предельное давление, наименьшее и наибольшее рабочее давление, наибольшее давление запуска и наибольшее выпускное давление.

Предельное давление насоса ( $P_{пр}$ ) – это минимальное давление, которое обеспечивает насос. При приближении к предельному давлению быстрота действия насоса стремится к нулю. Предельное давление большинства вакуумных насосов определяется их конструктивными особенностями, а также зависит от физико-химических свойств, применяемых рабочих веществ и материалов, используемых в них.

Наименьшее рабочее давление вакуумного насоса ( $P_m$ ) – это минимальное значение давления, при котором обеспечивается номинальная быстрота действия вакуумного насоса. Это давление примерно на порядок выше предельного. Использование насоса для работы в диапазоне между предельным и наименьшим рабочим давлениями нецелесообразно в виду низких эксплуатационных характеристик.

Наибольшее рабочее давление вакуумного насоса ( $P_о$ ) – это максимальное значение давления, при котором обеспечивается номинальная быстрота действия вакуумного насоса.

Давление запуска вакуумного насоса ( $P_з$ ) – это максимальное давление во входном сечении насоса, позволяющее начать работу данной ступени вакуумной откачки.

Наиболее эффективное использование вакуумного насоса обеспечивает его работа в рабочем диапазоне давлений (от наименьшего до наибольшего рабочего давления). На рис. 4.6 представлена зависимость быстроты действия насоса от указанных выше значений давлений ( $P_з, P_б, P_м, P_{пр}$ ).

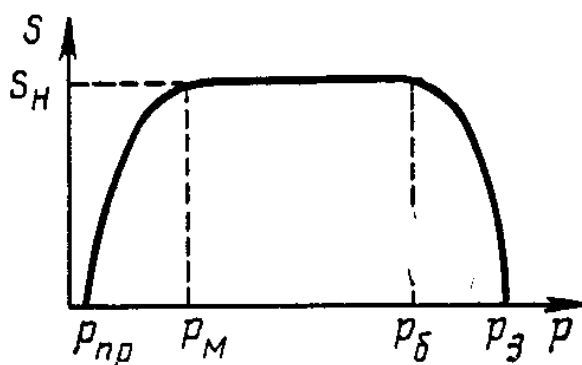


Рис. 4.6

В виду многообразия средств откачки и систем контроля вакуумных условий основное внимание в данном разделе будет уделено наиболее типичному оборудованию, применяемому в физических лабораториях общего, специального практикума и научно-исследовательских лабораториях кафедры экспериментальной физики РУДН.

### **Механические насосы объемной откачки**

Механические насосы объемной откачки делятся на поршневые, жидкостно-кольцевые и ротационные. Каждому из перечисленных типов соответствует дополнительное деление, отражающее специфику технического решения, положенного в основу конструкции насоса.

В многоступенчатых вакуумных системах в качестве насосов предварительного разрежения (форвакуумные насосы) наибольшее распространение получили ротационные насосы с масляным уплотнением. С их помощью создается предварительное разрежение в вакуумной системе и форвакуумное давление на выходе высоковакуумных насосов. Действие таких насосов основано на механическом всасывании откачиваемого газа в периодически расширяющийся объем рабочей камеры насоса. Изменение рабочего объема насоса обеспечивается вращением цилиндрического ротора. Различают три типа масляных ротационных насосов: пластинчато-роторные, пластинчато-статорные и золотниковые.

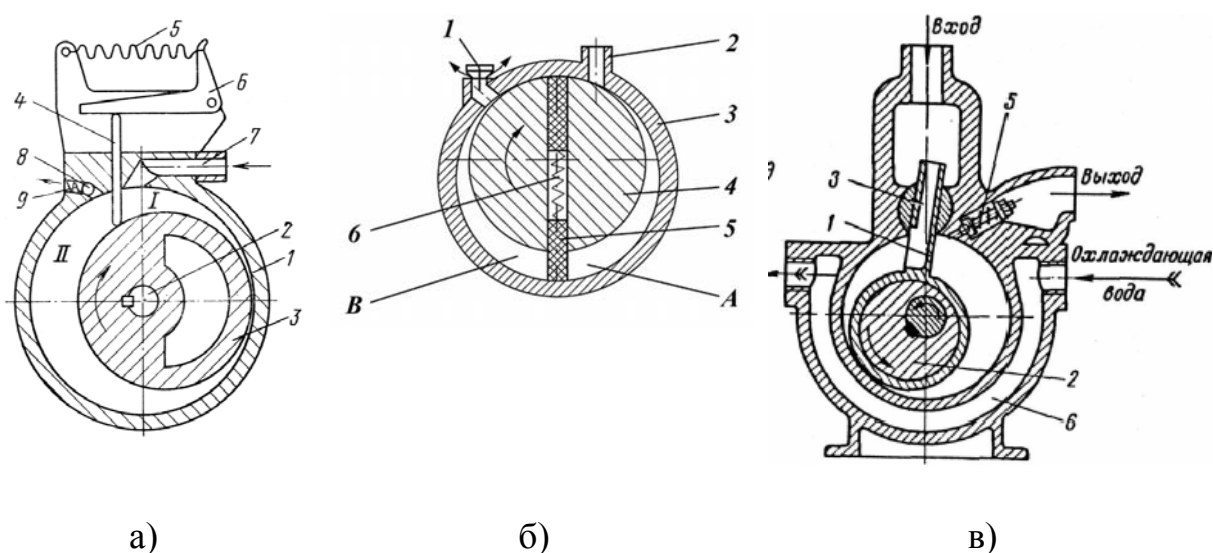


Рис. 4.7. Механические насосы объемной откачки: а) пластинчато-статорные; б) пластинчато-роторные; в) золотниковые;

Для понимания процессов откачки в таких насосах воспользуемся упрощенной моделью механического насоса объемной откачки (рис. 4.8), состоящего из поршня  $П$ , рабочей камеры  $P$  и двух клапанов – входного  $K_1$  и выходного  $K_2$ . При всасывающем ходе поршня клапан  $K_2$  закрыт.

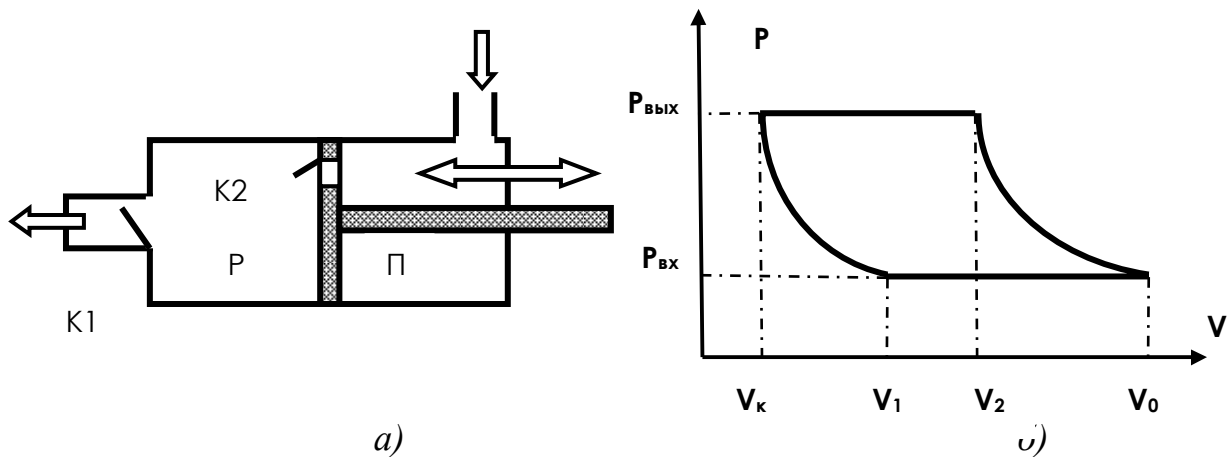


Рис. 4.8. Модель механического насоса (а), диаграмма процесса откачки (б)

В процессе объемной механической откачки происходят следующие основные процессы:

- всасывание откачиваемого газа за счет увеличения объема рабочей камеры насоса;
- сжатие газа за счет уменьшения объема рабочей камеры насоса;
- удаление сжатого газа из рабочей камеры насоса.

Поршень насоса находится в крайнем правом положении. Клапан  $K_2$  закрыт. Газ из откачиваемого объема через верхний клапан  $K_1$  постепенно заполняет рабочую камеру насоса, объем которой  $V_0$ . Процесс всасывания происходит при постоянном давлении ( $P_{вх}$ ). Затем поршень адиабатически сжимает газ до давления ( $P_{вых}$ ). Этому давлению соответствует объем  $V_2$ . В процессе сжатия клапан  $K_1$  закрыт. При достижении давления в камере, равном  $P_{вых}$ , открывается клапан  $K_2$ . Газ выбрасывается из камеры при постоянном давлении, равном  $P_{вых}$ . После достижения минимального объема рабочей камеры (остаточный объем)  $V_x$  (крайнее левое положение поршня насоса) начинается цикл всасывания. При этом выпускной клапан  $K_2$  закрывается не сразу, а после достижения в

рабочей камере давления  $P < P_{\text{вых}}$ , а клапан  $K_2$  открывается при давлении  $P < P_{\text{вых}}$ , соответствующем объему камеры  $V_1$ . Расширение остаточного газа от объема  $V_x$  до объема  $V_1$  идет адиабатически. В результате за полный цикл работы насоса откачивается количество газа, равное

$$G = (V_0 - V_1) P_{\text{вых}}. \quad (4.14)$$

Если в одну секунду насос делает  $N$  циклов, то поток откачиваемого газа в соответствии с (4.2) равен:

$$Q = N(V_0 - V_1) P_{\text{вых}}, \quad (4.15)$$

а скорость откачки согласно (4.4) будет составлять

$$S = N(V_0 - V_1). \quad (4.14)$$

Выражая  $V_1$  из уравнения адиабаты (участок  $V_k - V_1$ ), получим:

$$S = S_0 \left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{V_k}{V_0} \right], \quad (4.17)$$

где  $S_0 = V_0 N$ .

Для механического насоса предельному давлению соответствует условие  $S = 0$ , используя которое можно получить:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{вых}} \left( \frac{V_x}{V_0} \right)^{\gamma}. \quad (4.18)$$

Видно, что  $P_{\text{пр}}$  определяется параметрами насоса ( $V_x, V_0$ ), типом откачиваемого газа ( $\gamma$ ) и выпускным давлением, которое обычно равно атмосферному ( $P_{\text{вых}} = P_{\text{ат}}$ ).

Для получения остаточного давления по воздуху ниже  $10^{-3}$  Торр используют двухступенчатые насосы, состоящие из двух последовательно соединенных камер. Роторы обеих камер вращаются на одном валу, причем роторы сдвинуты друг относительно друга на некоторый угол. Когда ротор первой ступени выбрасывает газ, ротор второй ступени производит всасывание. Вторая ступень служит насосом предварительного разрежения для первой ступени. На выходе второй ступени стоит выхлопной клапан.

Рассмотрим работу насоса, в котором используют две последовательно соединенные ступени откачки. В этом случае выходное давление одной ступени откачки ( $P_1$ ) равно входному последующей ступени. Если величины  $V_0$  и  $V_x$  для обеих ступеней одинаковы, то скорость откачки двухступенчатого насоса равна

$$S = S_0 \left[ 1 - \left( \frac{P_1}{P_{\text{ex}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{V_x}{V_0} \right], \quad (4.19)$$

где  $P_1$  может быть определено из условия постоянства потока газа

$$P_{\text{ex}} S_0 \left[ 1 - \left( \frac{P_1}{P_{\text{ex}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{V_x}{V_0} \right] = P_1 S_0 \left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{am}}}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{V_x}{V_0} \right]. \quad (4.20)$$

В результате приближенное выражение для скорости откачки такого насоса принимает вид:

$$S \approx S_0 \left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{am}}}{P_{\text{ex}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{V_x}{V_0} \right)^2 \right], \quad (4.21)$$

а предельное давление определяется выражением:

$$P_{np} = P_{am} \left( \frac{V_x}{V_0} \right)^{2\gamma} . \quad 22)$$

Рассмотрим процессы объемной механической откачки на примере наиболее распространенного типа пластинчато-роторного насоса 2 НВР-5ДМ (рис. 4.7, б). Рабочая камера образована статическими элементами ( $A$  - полость всасывания,  $B$  - полость сжатия), цилиндрический корпус насоса 3, торцевые крышки (на рисунке не показаны), а также движущимися элементами: эксцентрично установленный ротор 4 и пластины 5, прижимаемые пружиной 6 к цилиндрическому корпусу насоса. При вращении ротора в направлении, указанном стрелкой, под действием сил упругости пружины 6 и центробежных сил пластины 5 прижимаются к цилиндрическому корпусу насоса, обеспечивая периодическое изменение объема рабочей камеры насоса ( $A$  и  $B$ ). Откачиваемый объем подключается к патрубку 2, сжатый газ выбрасывается через клапан 1. Полость  $A$  на стороне всасывания при вращении ротора увеличивает свой объем, и в нее поступает газ через впускной патрубок 2, соединяющий насос с вакуумной системой. Полость  $B$  на стороне выхлопа при вращении ротора уменьшает свой объем, в ней происходит сжатие. Когда давление в этой полости станет достаточным для открытия клапана 1, произойдет выхлоп. Величина максимального сжатия определяется отношением выхлопного давления к давлению на выходе в насос и составляет  $10^3$  Торр. В наружный кожух насоса (на рисунке не показан) заливается масло, служащее вакуумным уплотнителем. Вся рабочая камера насоса вместе с выхлопным клапаном 1 находится ниже уровня масла в насосе, тем самым исключается проникновение в камеру насоса атмосферного воздуха через клапан, приводной вал и торцевые соединения камеры. Выходной патрубок насоса (на рисунке не показан) располагается над уровнем насоса, предотвращая,



таким образом, засасывание масла в вакуумную систему при остановке насоса. Находящееся в рабочей камере насоса незначительное количество масла осуществляет уплотнение между полостями всасывания и сжатия (*A* и *B*), а также обеспечивает смазку трущихся поверхностей. В насосе 2НВР-5ДМ (Д - двухступенчатый) выход первой ступени соединен со входом второй ступени. Сжимаемый газ последовательно проходит обе ступени и выбрасывается через клапан второй ступени. На рис. 4.9 приведены зависимости быстроты действия применяемых пластинчато-роторных насосов от входного давления.

Большинство механических насосов объемной откачки могут обеспечить откачку до давления –  $10^{-3}$  Па. Для достижения более низких давлений применяют диффузионные, молекулярные и сорбционные насосы.

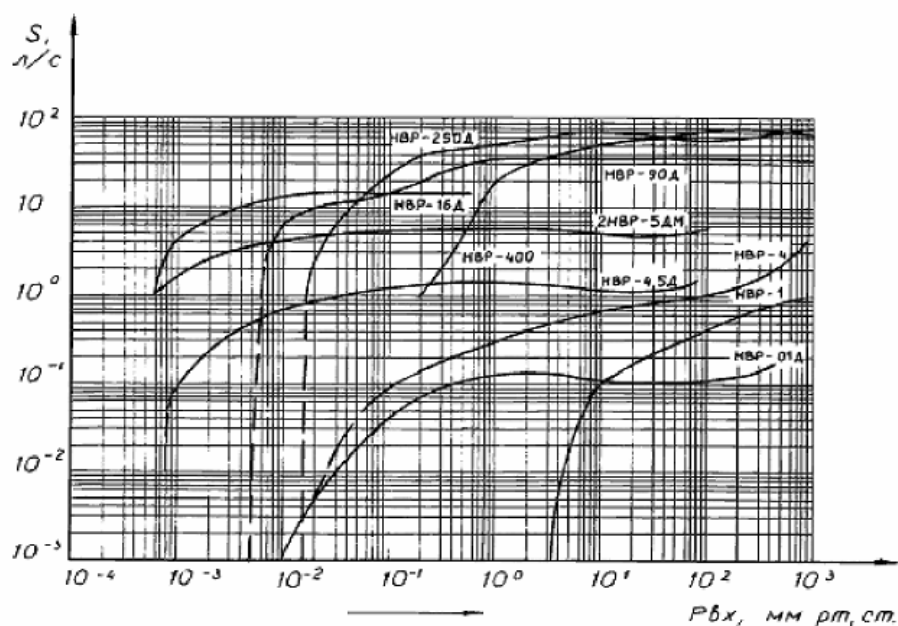


Рис. 4.9. Быстрота действия применяемых пластинчато-роторных насосов от входного давления

Работа механических насосов объемной откачки достаточно часто сопровождается проявлением нежелательных явлений: натеканием паров

рабочей жидкости в откачиваемый объем; загрязнением насоса откачиваемыми веществами с высоким давлением насыщенных паров; потерей рабочей жидкости через выпускной клапан и др.

В таких случаях при откачке вакуумных систем с большим количеством паров воды или других веществ с высоким значением давления насыщенного пара (при комнатной температуре) используется газобалластное устройство, которым достаточно часто снабжаются механические насосы. Это устройство позволяет снизить коэффициент компрессии в рабочей камере и предотвратить конденсацию в ней откачиваемых паров. В качестве газобалластных устройств может быть использован дополнительный клапан, открывающийся лишь во время сжатия откачиваемого газа в рабочей камере.

Для защиты откачиваемого объема от паров рабочей жидкости используются ловушки различных типов: механические, адсорбционные, ионные. В адсорбционных ловушках поглощение паров масла осуществляется в капиллярных каналах фильтров с адсорбционными материалами (угли, цеолиты и др.). Удаление поглощенных в фильтрах веществ осуществляется их прогревом до  $500^{\circ}\text{C}$  при закрытом клапане объема в процессе обезгаживания адсорбента.

В основе работы диффузионного насоса лежит диффузия молекул из входного патрубка в струю пара, увлечение газа, попавшего в струю, в направлении движения струи и удаление газа подключенным последовательно форвакуумным насосом. Направление диффузии газа из откачиваемого объема в струю пара происходит ввиду того, что парциальное давление газа в струе меньше, чем в откачиваемом объеме. Схема одноступенчатого пароструйного диффузионного насоса и распределение концентрации пара и молекул откачиваемого газа в различных сечениях представлена на рис. 4.10.

Основные элементы диффузионного насоса: паропровод, сопло и диффузор. Конструкция сопла должна быть такой, чтобы струя пара была как можно более равномерной и параллельной диффузору. Движущаяся с большой скоростью ( $\omega$ ) струя пара попадает в диффузор, движется вдоль его оси и заполняет все его сечения. Молекулы газа из откачиваемого объема диффундируют в струю пара и увлекаются к выходному патрубку. Далее газ откачивается механическим насосом.

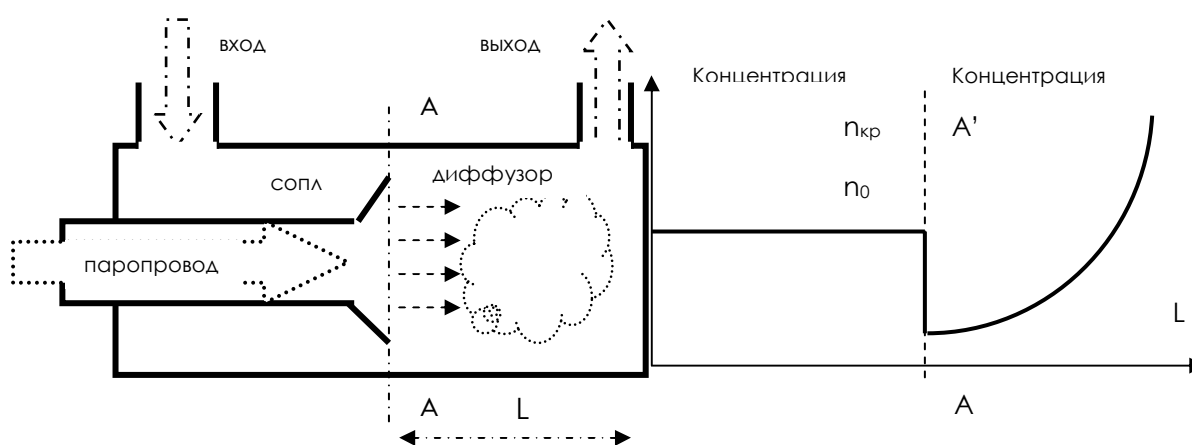


Рис. 4.10

Для эффективной откачки необходимо, чтобы молекулы газа свободно проникали вглубь струи пара, что возможно при: а) низкой его плотности и б) относительно малом выходном давлении ( $\leq 10^2$  Па).

Предположим, что струя пара равномерно заполняет сечение диффузора справа от плоскости сопла ( $AA'$ ). Через кольцеобразный зазор между соплом и стенками диффузора молекулы газа из откачиваемого объема проникают в струю пара. В сечении ( $AA'$ ) возникает скачок концентрации молекул ( $n$ ). Обозначив через  $\bar{v}$  среднюю арифметическую скорость молекул газа, запишем выражение для числа молекул, проходящих в 1 с через сечение в  $1 \text{ см}^2$ , расположенное в плоскости ( $AA'$ ):

$$N = \frac{1}{6} \bar{v} (n_0 - n_1), \quad (4.23)$$

и используем его в уравнении для потока газа

$$Q = \frac{1}{6} \bar{v} (n_0 - n_1) kTF, \quad (4.24)$$

где  $T$  – температура газа в откачиваемом объеме;  $F$  – площадь сечения зазора между соплом и диффузором.

Полагая, что входное давление газа  $P_{gx} = n_0 kT$ , для скорости откачки запишем:

$$S = \frac{Q}{n_0 kT}. \quad (4.25)$$

Справа от плоскости (AA'), вдоль диффузора, концентрация молекул газа возрастает, т.е. имеем зависимость  $n(x)$ . В произвольной точке  $x$  в области диффузора струя пара переносит в единицу времени через единичное сечение число молекул

$$N_1 = n(x) \omega. \quad (4.26)$$

В обратном направлении плотность потока молекул

$$N_2 = -D \frac{dn(x)}{dx} \quad (4.27)$$

определяется градиентом концентрации и коэффициентом диффузии газа в парах масла. Результирующий поток газа равен:

$$Q = \left\{ n(x) \omega - D \frac{dn}{dx} \right\} kTF. \quad (4.28)$$

Совместное решение этого уравнения с уравнениями (4.24) и (4.25) позволяет получить выражение для скорости откачки

$$S = \frac{F\omega \left( \frac{P_{вых}}{P_{вх}} - e^{-\frac{\omega L}{D}} \right)}{1 - e^{-\frac{\omega L}{D}}}, \quad (4.29)$$

( $L$  – длина диффузора) и предельного давления насоса:

$$P_{np} = P_{вых} \exp \left\{ -\frac{\omega L}{D} \right\}. \quad (4.30)$$

С помощью диффузионных насосов получают давление до  $10^{-6}$  Торр. Достижению более низких давлений мешает проникновение паров масла в откачиваемый объем, однако использование «азотных ловушек», вымораживающих пары масла, и специальных типов масел частично решает эту проблему.

Как и в случае использования механических насосов, для уменьшения предельного давления используют многоступенчатые диффузионные насосы. Каждой ступени соответствует свой паропровод и свое сопло. На рис. 4.11 представлена схема трехступенчатого диффузионного насоса.

Внутренний, средний и наружный трубопроводы ступеней, стоящие вертикально, погружены нижними открытыми концами в масло, подогреваемое в испарителе. Верхние концы паропроводов заканчиваются зонтообразными соплами ступеней. Сопла проворачивают струи пара, направляя их от входа насоса к выходу вдоль оси диффузора, который охлаждается внешним контуром. Сконденсировавшееся на стенках холодильника масло стекает вниз в испаритель. Если вещество (масло), используемое в испарителе, состоит из нескольких фракций, то

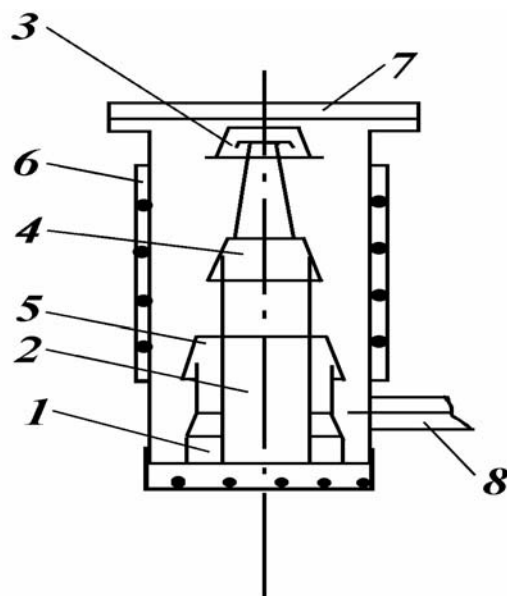


Рис. 4.11. Трехступенчатый диффузионный насос:

1 – испаритель; 2 – паропроводы ступеней; 3 – сопло I ступени; 4 – сопло II ступени; 5 – сопло III ступени; 6 – корпус с холодильником; 7 – входной патрубок; 8 – выходной патрубок

осуществляется их сепарация. Наиболее тяжелые фракции, с наименьшим давлением насыщенных паров, поступают в близлежащее к откачиваемому объему сопло из центрального паропровода, а более легкие фракции – в удаленные от него сопла. Это предотвращает попадание масла в вакуумную систему и способствует снижению предельного давления насоса. Сепарация возникает за счет градиента температуры в нагревателе.

Распределение давлений по ступеням трехступенчатого насоса в единицах Торр составляет примерно:

$P_{\text{вых}}$  - давление на выходе насоса  $10^{-1}$  Торр

$P_{\text{эжект}}$  - давление на выходе эжектора  $10^{-2}$  Торр

$P_3$  - давление на выходе сопла третьей ступени  $10^{-4}$  Торр

$P_{\text{вх}}$  – давление на входе насоса  $10^{-6}$  Торр

В качестве рабочих жидкостей диффузионных насосов применяются ртуть и специальные сорта масел (апиэзоновые масла, сложные эфиры органических спиртов и кислот, кремнийорганические соединения). Основной характеристикой вакуумных масел является давление насыщенных паров, которое должно составлять  $10^{-6} - 10^{-8}$  Торр при  $20^{\circ}\text{C}$ . Применяемые масла не допускают перегрева. Также недопустимо их соприкосновение в горячем состоянии с атмосферным воздухом во избежание окисления и разложения на легколетучие фракции.

В простейшем варианте молекулярный насос состоит из металлического ротора, вращающегося с большой скоростью внутри герметически закрытого корпуса. В отличие от ротационных механических насосов в турбомолекулярном отсутствует физическая граница между объемами низкого и высокого вакуума. Молекулы газа, поступающие во входное отверстие с тепловыми скоростями, претерпевают столкновения с быстровращающейся поверхностью ротора, приобретая высокую скорость направленного движения. Для эффективной работы необходимо, чтобы дополнительная скорость, приобретаемая молекулами, значительно превосходила скорость теплового движения, тем самым длина свободного пробега превышала линейные размеры входного отверстия насоса.

В условиях молекулярного течения давление на выходе и входе насоса (степень сжатия) определяется из следующего соотношения:

$$\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \exp(A \cdot \omega),$$
 где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $A$  – константа,

зависящая от геометрии ловушки насоса и свойств откачиваемого газа. Увеличение величины  $A$  достигают путем увеличения площади ротора (установка лепестков турбин, спиральные желобки и т.п.) и уменьшения зазора между ротором и статором. Современные электронные схемы управления двигателями постоянного тока обеспечивают частоту

обращения ротора в диапазоне от 10 000 до 45 000 об/мин, обеспечивая скорость откачки в диапазоне 250 - 15 000 м<sup>3</sup>ч<sup>-1</sup>. Высокая скорость вращения создает значительные нагрузки в подшипниках, которые необходимо эффективно смазывать потоком масла и охлаждать.

Насосы, реализующие этот механизм откачки, имеют много различных конструктивных решений (горизонтальный или вертикальный ротор), схематически изображенных на рис. 4.12.

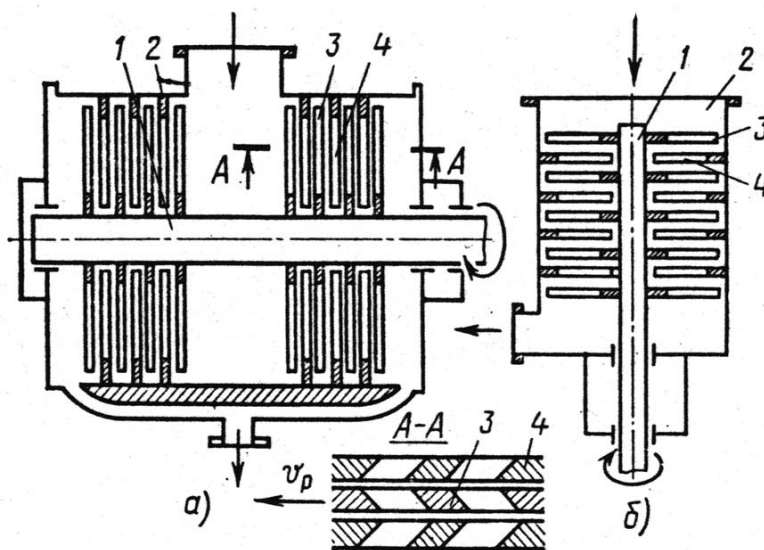


Рис. 4.12. Турбомолекулярный насос:

*a* - горизонтальный ротор, *б* - вертикальный ротор

На оси насоса расположен вал *1*. На валу находятся роторные диски *3*. По периметру каждого диска расположены косо поставленные отражающие лопасти. С роторными дисками чередуются статорные диски *4*, аналогичные роторным, но укрепленные на корпусе камеры насоса *2*. Ротор вращается со скоростью  $\approx 10\,000$  об/мин. Насос начинает работать при достаточно малом давлении, когда средняя длина свободного пробега молекул газа больше зазора между дисками. Молекулы при ударе об отражающие лопасти получают компоненту скорости, направленную вдоль оси камеры, и перемещаются к торцевым поверхностям насоса.



Быстрота откачки этого типа насосов слабо зависит от рода газа. Предельное давление насосов ( $10^{-7} - 10^{-8}$ ) Па. Наибольшее выпускное давление таких насосов для воздуха – (1 – 10) Па.

К достоинствам турбомолекулярных насосов относятся: высокая удельная быстрота действия ( $2 \text{ л/см}^2\text{с}$ ), широкий диапазон рабочих давлений ( $10^{-6} - 10$ ) Па, быстрый запуск – (5 – 10) мин., практически безмасляный спектр остаточных газов.

К недостаткам следует отнести невысокую надежность подвеса ротора насоса.

### 4.3. Вакуумная арматура, элементы вакуумных систем

Вакуумная система любой сложности представляет собой конструкцию, состоящую из набора различных типов клапанов, вентилях, разъемных и неразъемных соединений электрических, оптических и механических вводов и разнообразных конструкций различных элементов и узлов (ловушки, натекатели и т.п.). Арматура, предназначенная для работы в условиях вакуума (и материалы из которых она изготовлена), должна соответствовать жестким требованиям (табл. 4.2), а также быть стандартизированной по линейным размерам. Вакуумные установки отличаются по своему назначению и по степени вакуума, получаемого в откачном объеме. В системах, в которых не требуется достижение вакуума выше  $10^{-4}$  Па, допускаются детали из стекла, металла, эластомеры (натуральный и синтетический каучук, витон, калреп) некоторых пластмасс (оргстекло). Откачку при этом можно осуществлять механическими и пароструйными насосами. Для получения более высокого вакуума ( $P < 10^{-6}$  Па) вакуумная система подвергается обезгаживанию при высокой температуре. В таких установках применяются металлические уплотнительные прокладки (индий, алюминий, медь и др.), цельнометаллические краны и затворы без смазки, используются определенные виды материалов. Откачку осуществляют сорбционными насосами.

Современные вакуумные системы позволяют получать вакуум до ( $5 \cdot 10^{-11}$ ) Па. Дальнейшее разрежение ограничено диффузией сквозь металл водорода и гелия из атмосферы, хотя и используются такие методы защиты, как расположение камеры со сверхвысоким вакуумом в объеме с высоким вакуумом.

Все изделия должны отвечать следующим основным требованиям: минимальное натекание и газовыделение, термическая стойкость,

многократное число циклов сборки без нарушения герметичности, удобство и технологичность изготовления, ремонта и эксплуатации.

Таблица 4.2. Удельное газовыделение при комнатной температуре

<i>Материал</i>	<i>Сталь нержавеющая</i>	<i>Cu</i>	<i>Латунь</i>	<i>Al</i>	<i>Ni</i>	<i>Вакуумная резина</i>
$s, 10^{-4}$	0,4	2,0	3,3	0,06	0,07	100
Па·м/с						

Для соединения вакуумных компонентов высоковакуумных и сверхвысоковакуумных систем принято пять промышленных стандартов:

Del-Seal ConFlat - фланцы с металлическим уплотнением, как правило, медным;

ISO LF Large-Flange - фланцы с уплотнением вакуумным эластомерным материалом, применяются для размеров, начиная с  $D_y$  63 мм;

ISO KF Kwik-Flange - крепление с помощью накидного хомута с уплотнением из эластомера, применяется в диапазоне от  $D_y$ 10 до  $D_y$ 50 мм;

ANSI-ASA фланцы - стандарт американского национального института по стандартизации, применяемый уплотнитель эластомер;

Quick-Disconnect - быстроразъемные для соединения металлических и стеклянных труб.

Различными производителями выпускаются адаптеры для перехода с одного стандарта вакуумных элементов на другой. Гибкие вакуумпровода изготавливаются из сильфонов и различных типов эластомеров с толщинами стенок равных диаметру проходного отверстия для исключения их сжатия атмосферным давлением. Вакуумные окна изготавливаются из разнообразных материалов, включая различные типы

стекло. Неразъемные элементы арматуры в большинстве своем изготовлены из сверхчистых материалов, позволяющих их использовать в сверхвысоковакуумных системах, и используют самые последние достижения в технологии пайки стекло-металл и керамика-металл, сварки металл-металл.

В большинстве вакуумных клапанов и затворов используются различные типы и механизмы приводов и индикаторов позиции.

Большинство вакуумных клапанов и затворов (шиберные устройства) различаются по рабочему давлению, способу обеспечения герметизации.

Электрические токовводы производятся с использованием соединения керамика-металл. Используемые сверхчистые алюмооксидная керамика (корундовая керамика) с металлами, имеющими малый коэффициент термического расширения, обеспечивают изготовление самых надежных и герметичных соединений керамика-металл. Такие вакуумные токовводы используются во многих вакуумных системах, обеспечивая подачу в вакуумную камеру электрического тока, высокого напряжения, или вывод из вакуумной камеры сигналов от различных инструментов и датчиков. Вакуумные вводы вращательного, линейного или комбинированного движения обеспечивают точное перемещение образцов внутри вакуумной камеры. В большинстве своем движения ввода регулируются высокоточным микрометром и передаются плавным шнековым механизмом, магнитным транспортером и т.п. С целью возможности их применения в сверхвысоковакуумных системах и для повышения их надежности используются привода с приваренным сильфоном.

#### **4.4. Общие правила построения высоковакуумных систем и их эксплуатации**

Общий принцип построения высоковакуумного стенда состоит в последовательном соединении при помощи разнообразных элементов

вакуумной арматуры форвакуумной и высоковакуумной частей. Обязательными элементами форвакуумной части являются: форвакуумный насос, обеспечивающий предварительное разрежение для запуска высоковакуумного агрегата; элементы вакуумной арматуры, устанавливаемые в форвакуумной линии (вакуумные краны, клапаны, натекатели, шибберные устройства, сильфонные развязки) и обеспечивающие герметичное соединение и условия правильной эксплуатации вакуумных агрегатов. Высоковакуумная часть установки состоит из: высоковакуумного агрегата, вакуумного шиббера, обеспечивающего отключение рабочей камеры от вакуумного агрегата, системы прецизионного натекания, обеспечивающего натекание рабочего газа и поддержания рабочих вакуумных характеристик (давление, массовый расход), байпасной линии с клапаном, обеспечивающей предварительную откачку рабочей камеры после проведения технологических операций.

В ряде случаев в форвакуумную линию перед шибберным устройством, разделяющим высоковакуумную часть и форвакуумную линию, подключают форвакуумный баллон, обеспечивающий работу высоковакуумного агрегата на время откачки рабочей камеры после проведения технологических операций через байпасную линию. При использовании паромасляных насосов в высоковакуумной части (между вакуумным насосом и рабочей камерой) для улавливания паров рабочей жидкости насоса устанавливают криоловушку.

При разработке вакуумного стенда и его комплектации необходимо пользоваться следующими правилами. При выборе высоковакуумного агрегата надо иметь в виду, что его рабочий диапазон примерно на один-два порядка должен превосходить требуемое остаточное давление. Мощность применяемого типа насоса (скорость откачки) при заданном времени откачки может быть определена по графику, связывающему

давление и время откачки, прилагаемому изготовителем. В первом приближении можно руководствоваться следующими цифрами: для поддержания давления в диапазоне  $10^{-4} - 10^{-5}$  Торр в «чистом» рабочем объеме с площадью полной поверхности  $1 \text{ м}^2$  требуется скорость откачки 20 л/с, для откачки такого же объема до указанного давления за 1 мин требуется насос со скоростью откачки – 200 л/с. Для определения типа форвакуумного насоса, подходящего для выбранного высоковакуумного агрегата, необходимо иметь графики зависимости скорости откачки от давления для обоих насосов. Выбор форвакуумного насоса осуществляется исходя из того, чтобы значение максимально допустимого для данного высоковакуумного агрегата давление предварительного разрежения попадало в рабочий диапазон давления форвакуумного насоса, кроме того скорость откачки форвакуумного насоса при этом давлении должна быть не меньше скорости откачки высоковакуумного агрегата.

Измерительная часть установки состоит из манометрических преобразователей различных типов, включенных как в форвакуумную линию, так и в высоковакуумную часть установки для контроля и управления работой вакуумного стенда в целом.

Первичное состояние высоковакуумного стенда:

- Вход форвакуумного насоса соединен с атмосферой (исключает натекание масла в систему);
- Клапаны и шибера разделяют рабочую камеру, высоковакуумный агрегат, форвакуумную линию.

Запуск высоковакуумного стенда в работу осуществляется в следующей последовательности:

- Закрывают клапан, соединяющий вход форвакуумного насоса с атмосферой;
- Включают форвакуумный насос, подключают его к

форвакуумной линии, по измеренному значению давления убеждаются в его работоспособности;

- Открывают вакуумный затвор, соединяющий его высоковакуумным агрегатом;
- Производят предварительную откачку высоковакуумного агрегата;
- Закрывают вакуумный затвор, соединяющий форвакуумный и высоковакуумный агрегаты;
- Откачивают рабочий объем через линию байпаса;
- По измеренным значениям форвакуума оценивают герметичность стенда по частям и в целом. При необходимости отыскивают и устраняют течи;
- После достижения необходимого предварительного разрежения производят переключение клапанов форлинии от системы байпаса к последовательному подключению форнасоса к высоковакуумному агрегату, подают в систему охлаждения агрегата воду и осуществляют его запуск.

К основным правилам эксплуатации как диффузионных, так и турбомолекулярных насосов относятся: строгое соблюдение последовательности включения и выключения насоса; поддержание в заданных пределах температуры и расхода охлаждающей воды, а также правильный выбор производительности форвакуумного насоса.

В процессе эксплуатации вакуумного стенда могут возникнуть различные аварийные ситуации: прорыв атмосферы, резкое снижение давления охлаждающей жидкости и т.п. Экстренные и своевременно принятые меры по устранению причин возникновения указанных ситуаций избавят в дальнейшем персонал от неизбежности восстановительных работ, позволят существенно снизить их объем. В этих целях основные

узлы вакуумного стенда оснащаются автоматизированной системой звуковой и оптической сигнализации (аварийные датчики давления).

Последовательность действий при возникновении нештатных ситуаций:

При нарушении герметичности в рабочем объеме необходимо резко перекрыть шибер, разделяющий основные элементы стенда - рабочий объем, высоковакуумный агрегат. Принять меры по устранению течи. После устранения течи по линии байпасной откачки откачать рабочий объем и произвести последовательное подключение высоковакуумного агрегата.

При резком снижении расхода жидкостного охлаждения закрывают шиберный затвор и производят аварийную остановку высоковакуумного агрегата, форвакуумная откачка не прекращается.

#### **4.5. Методы измерения давления**

Вакуумные измерения – измерение физических величин, характеризующих вакуум как разреженное состояние газа (полные и парциальные давления, массовый расход газа, быстрота откачки, проводимость вакуумных элементов, концентрация газовых молекул и т.п.).

Средства измерений, применяемые для измерения полных абсолютных давлений, называют манометрами или вакууметрами. Для измерения полных давлений в вакуумных системах традиционно применяют следующие методы:

**Механические** – измерение деформации упругого элемента (мембрана, сильфон и др.) пропорционально давлению;



**Гидростатические** – измеряемое давление уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости;

**Тепловые** – используется зависимость теплопроводности газа от степени его разрежения;

**Ионизационные** – ток положительных ионов, образованных в результате ионизации электронами пропорционален давлению в широком диапазоне;

**Магниторазрядные** – величина тока самостоятельного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях пропорциональна давлению;

**Радиоизотопные преобразователи** – ионизация газа осуществляется радиоизотопами.

Манометры или вакуумметры – приборы, предназначенные для измерения давлений ниже 1 атм. По принципам регистрации всю группу манометров разделяют на манометры прямого и косвенного действия. Жидкостные, компрессионные и деформационные манометры относят к манометрам прямого действия. Они непосредственно измеряют давление газа. Их показания принципиально не зависят от состава газа и лишь опосредованно (например, для жидкостных манометров) могут зависеть от температуры. Манометры косвенного действия измеряют не само давление, а некоторую его функцию. Их показания зависят от рода газа и его температуры. На рис. 4.13 представлены диапазоны рабочих давлений вакуумметров различных типов.

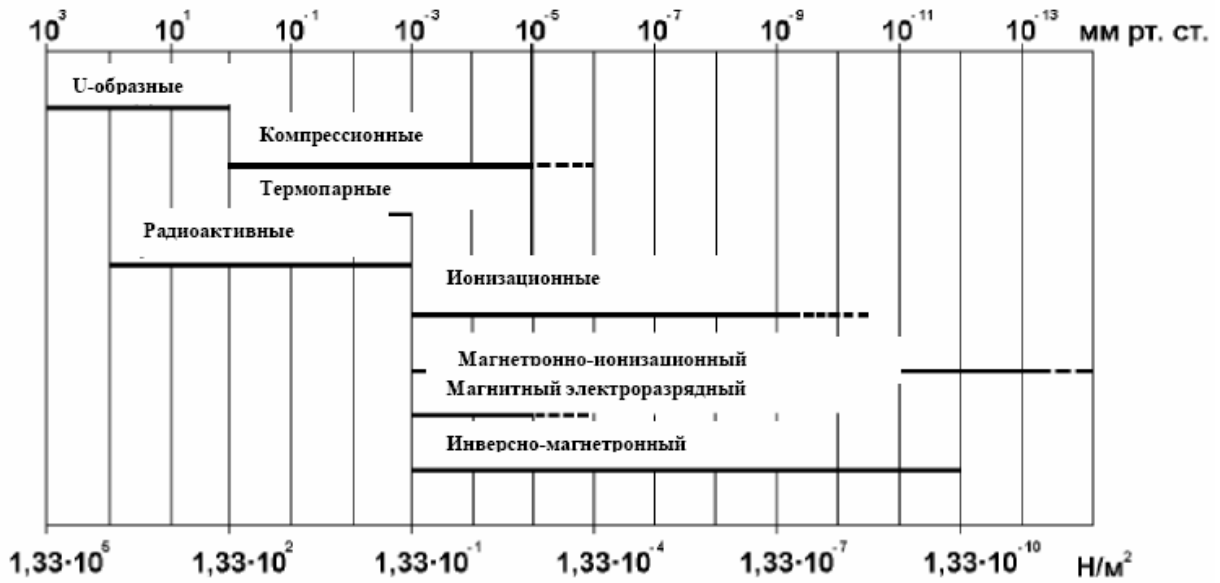


Рис. 4.13. Диапазоны работы манометров различных типов

Ориентировочные пределы измерений и допускаемые погрешности манометров различных типов (1 - гидростатические, 2 - механические, 3 - тепловые, 4 - ионизационные, 5 - магниторазрядные), базирующихся на указанных выше методах, представлены на рис.4.14.

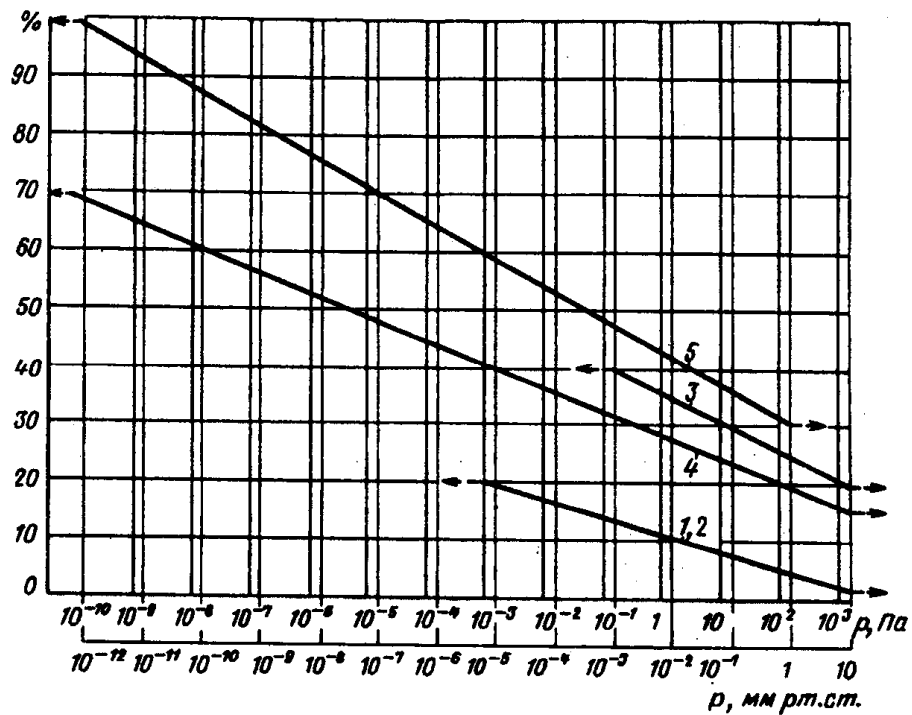


Рис. 4.14

При проведении абсолютных измерений конкретным типом вакуумметра необходимо руководствоваться документами производителя.

В механических деформационных манометрах (рис. 4.15, а) давление определяется по деформации упругой дугообразной трубки, чувствительной мембраны или сильфона, вызываемой разностью давлений. Эти манометры обычно используются для измерения давлений в диапазоне  $(760 - 10^2)$  Торр.

В трубчатых манометрах в качестве чувствительного элемента используют трубку, свернутую в спираль. Один конец трубки подключен к вакуумной системе, а другой запаян и соединен со стрелкой, угол поворота которой прямо пропорционален разности атмосферного давления и давления в системе.

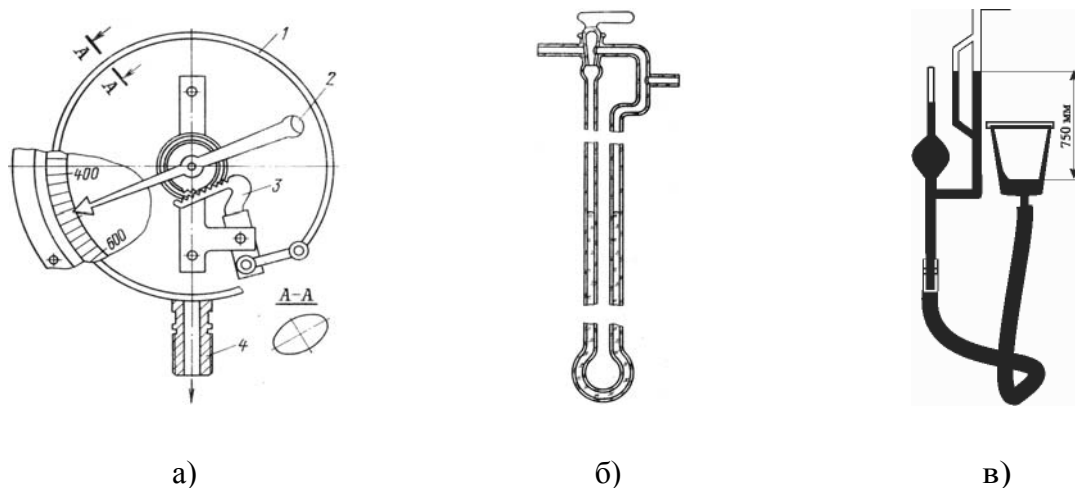


Рис. 4.15

Недостатком такого манометра является зависимость показаний от атмосферного давления.

Мембранные манометры лишены подобного недостатка. В мембранном манометре мембрана разделяет откачанный до давления  $\sim 10^{-3}$  мм рт. ст. объем сравнения и объем с измеряемым давлением. Поскольку давление в

объеме сравнения низко, можно считать, что манометр измеряет непосредственно искомое давление.

Принцип действия сильфонных манометров тот же, но мембрана в них заменена гофрированной трубкой - сильфоном. При тех же габаритах сильфоны имеют гораздо меньшую жесткость, что позволяет обеспечить большую чувствительность измерений.

Преимуществами мембранных и сильфонных методов является возможность непрерывной записи показаний вакуумметра. Для этого используют емкостной или индукционный метод регистрации в чувствительных мостовых схемах. При применении емкостного метода упругий элемент является подвижной обкладкой емкости. В случае индукционного метода регистрации упругий элемент соединяется с сердечником катушки индуктивности. Разбаланс моста при прогибе чувствительного элемента регистрируется измерительным прибором.

В U-образных жидкостных и компрессионных манометрах измеряется разность давлений в двух коленах U-образной трубки (рис. 4.15, б). Манометр заполняется жидкостью, имеющей малое давление насыщенных паров. Одно колено манометра может подвергаться откачке, а другое – быть соединенным с исследуемым объемом. Точность измерения давления этим прибором обычно не превышает 0,1–0,5 мм столба используемой в нем жидкости. Если в качестве жидкости использовать ртуть, то точность составляет (0,1–0,5) Тор. Данный тип манометров не может быть использован для определения давления паров той жидкости, которая применена в приборе.

Суть измерений в компрессионном манометре Мак –Леода (рис.4.15, в) практически совпадает с измерениями U-образным манометром, с той лишь разницей, что газ при начальном давлении,

равном измеряемому, сжимается и измеряется разность давлений между двумя сообщающимися сосудами.

Принцип действия термоэлектрических манометров основан на зависимости коэффициента теплопроводности газа от давления. Примером этого типа манометров может служить термопарный манометр, состоящий из нити накала, нагреваемой электрическим током, и соединенной с ней термопары. Конструкция и схема измерения типичного преобразователя ПМТ-2 представлены на рис. 4.16, *а*, *б*, где 1 корпус; 2 нить накала; 3 термопара; 4 ввод питания. Изменение теплопроводности газа с изменением давления приводит к изменению температуры нити накала и, следовательно, к изменению термо-ЭДС, величина которой регистрируется. Верхняя граница измеряемых этим типом манометров давлений ( $P$ ) определяется условием зависимости коэффициента теплопроводности ( $\chi$ ) от  $P$ : 
$$\chi = \frac{AP}{P+B},$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные величины, зависящие от типа газа, материала нити накала и его геометрии. Видно, что в области низкого вакуума ( $P \gg B$ ) коэффициент теплопроводности не зависит от давления.

Тепловой баланс нити накала можно записать в виде:  $I^2R = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3$ , где  $I^2R$  – мощность, выделяемая током на сопротивлении нити накала;  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  – соответственно потери тепла за счет теплового излучения, теплопроводности держателей нити, теплопроводности газа. При уменьшении давления уменьшается плотность газа и его теплопроводность падает. При этом температура нити ( $I = \text{const}$ ). Возможна ситуация, при которой потери тепла за счет теплового излучения и теплопроводности держателей нити накала становятся больше, чем потери, связанные с теплопроводностью газа, т.е.  $\xi_1 + \xi_2 > \xi_3$ .

Фактически это условие определяет нижнюю границу давлений, измеряемых термопарным манометром. В относительно небольшой области давлений можно считать  $\chi = K_T P$ , где  $K_T$  – коэффициент, определяемый характеристиками прибора и типом газа или смеси газов. На рис. 4.17 представлены градуировочные кривые термопарного манометра ПМТ-2.

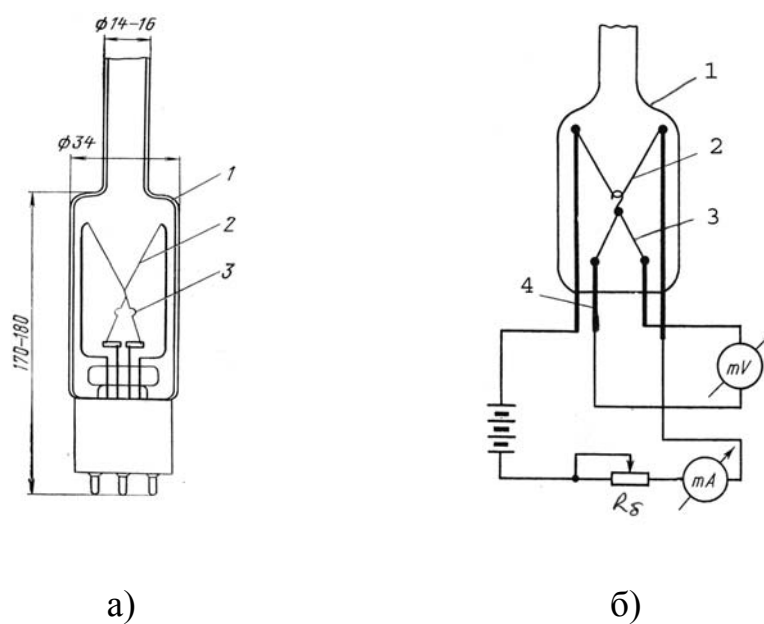


Рис. 4.16

Преимуществом тепловых преобразователей является то, что они могут измерять общее давление всех газов и паров, присутствующих в вакуумной системе, и обеспечивают непрерывность измерений.

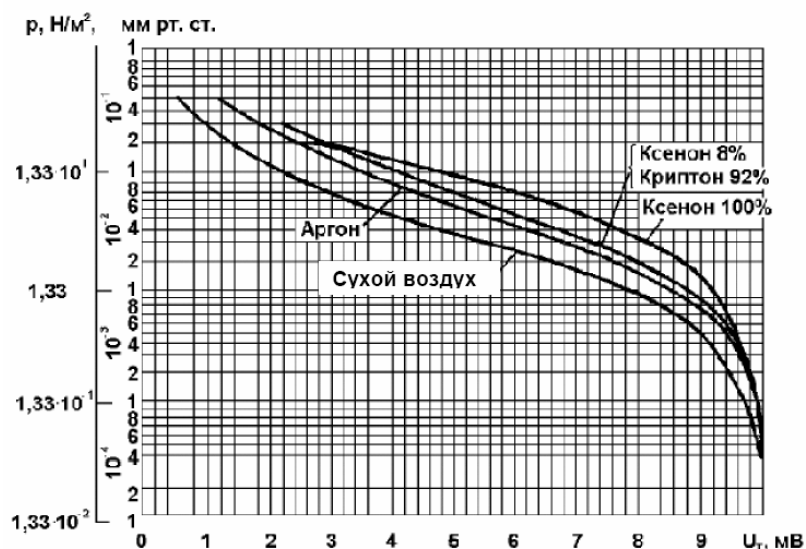


Рис. 4.17. Градуировочная кривая термопарного манометра ПМТ-2

Инерционность прибора связана с тепловой инерцией нити накала и изменяется от нескольких секунд при низких давлениях до нескольких миллисекунд при высоких. Диапазон рабочих давлений термопарного манометра составляет  $(5 \cdot 10^3 - 10^{-1})$  Па.

Термопарные манометры не реагируют на резкую разгерметизацию, их ресурс работы практически неограничен.

Ионизационный манометр измеряет давление ниже  $10^{-1}$  Па. Принцип действия манометра основан на зависимости между давлением и ионным током, возникающим в результате ионизации электронами молекул газа.

Электрическая схема типичного ионизационного манометра представлена на рис. 4.18, там же проиллюстрирован принцип его работы.

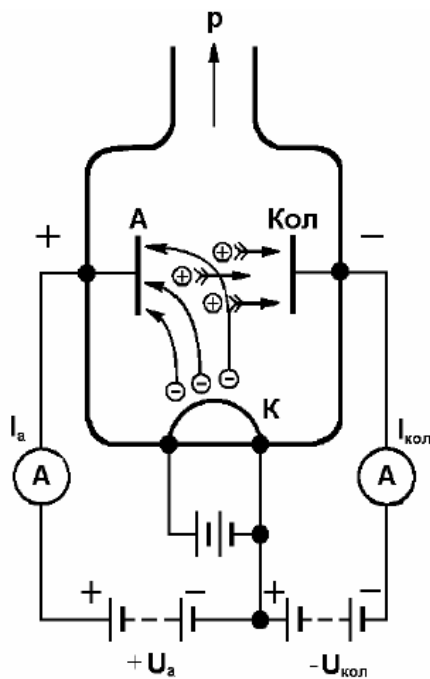


Рис. 4.18

Манометрическая лампа имеет катод, анод и собирающий коллектор. Термоэлектроны, ускоренные в поле между катодом и анодом, осуществляют ионизацию молекул газа, которые собираются коллектором, находящимся под отрицательным потенциалом.

Ввиду того, что эффективность ионизации газов различна (рис. 4.19),

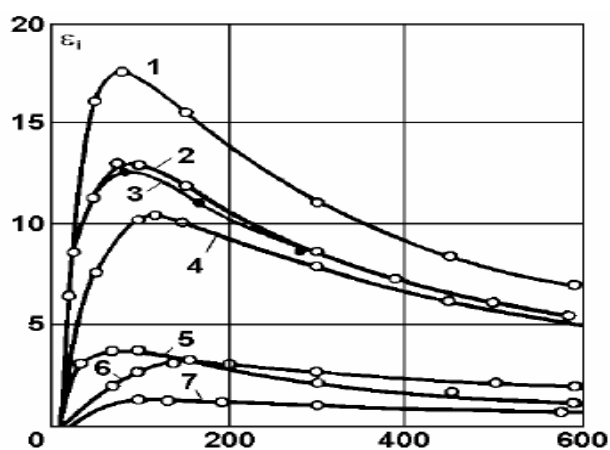


Рис. 4.19. Зависимость эффективности ионизации от энергии электронов  
 1- ацетилен, 2-кислород, 3 - азот, 4 - аргон, 5 - водород, 6 - неон, 7 - гелий  
 (1 мм.рт.ст., 0° С)



ионизационный ток на коллектор ( $i_p$ ) являющийся мерой давления газа

$P = C i_p$ , должен зависеть не только от типа манометра, но и от типа газа ( $C$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий тип манометра и тип газа).

Одновременно с ионизацией электронный удар может привести к возбуждению молекул, последующая дезактивизация которых сопровождается излучением квантов энергии. Фотоны, в свою очередь, вызывают фотоэмиссию электронов с коллектора манометра. Если давление мало (менее  $10^{-5}$  Па), то ионный ток становится сравнимым или меньше фототока. Фотоэффект ограничивает рабочую область ионизационного манометра со стороны низких давлений. При больших давлениях (свыше 1 Па) существует опасность перегрева катода, а в присутствии химически активных газов (кислород) он быстро разрушается.

На рис. 4.20 представлен калибровочный график достаточно распространенного ионизационного манометра типа ПМИ-2. Видно, что в достаточно широком диапазоне регистрируемый ток строго пропорционален величине давления.

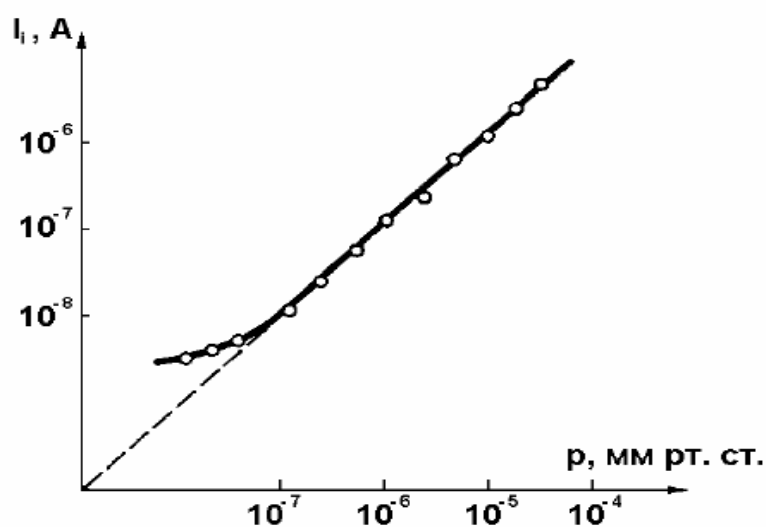


Рис. 4.20  
185

Для того чтобы учесть величину поправки, связанной с разной чувствительностью ионизационного манометра для разных газов, в табл. 4.3 приведены коэффициенты относительной чувствительности для манометра ПМИ-2, где коэффициент определяется отношением чувствительности манометра для сухого воздуха к чувствительности для данного газа.

Таблица 4.3.

Газ	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	He	Ne	Ar	Kr	Xe	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O
1/q <sub>i</sub>	1	2.18	1.9	4	0.76	0.51	0.37	1.05	0.65	0.9	1.1

Принцип действия магнитных преобразователей основан на зависимости тока самостоятельного газового разряда от давления в скрещенных магнитом и электрическом полях.

В радиоизотопных преобразователях для ионизации газа используется  $\alpha$ - или  $\beta$ -излучение радиоактивных изотопов.

Ряд фактов, которые могут проявиться во вновь созданных или модернизированных установках, может препятствовать достижению расчетного (минимального) давления: неисправность насосов, газовыделение из материалов элементов вакуумной системы, натекание в систему атмосферного воздуха («течи»).

Чтобы определить, какая из этих причин является основной, следует изолировать при помощи вакуумного затвора систему от насоса и провести измерение зависимости давления в системе от времени. По характеру этой зависимости определяется причина неисправности.

Некоторые дополнительные приемы определения причины неисправности:

1. Если система «газит», то залив жидкого азота в ловушку приводит к резкому уменьшению давления в системе. Это связано с тем, что подавляющее большинство компонентов смеси, выделяемой стенками, конденсируется при температуре жидкого азота. Если в системе «течь», то показание манометра практически не изменится, так как в систему из атмосферы натекают газы, (в основном) неконденсируемые при этих температурах. Этот метод может быть применен и при отсутствии специальной ловушки: на стеклянную (металлическую) трубку, соединяющую манометр с вакуумной системой, наматывают вату в виде кольца и заливают ее жидким азотом (в стекле должны отсутствовать внутренние напряжения).

2. Наличие «течей» в стеклянных деталях вакуумной установки может быть определено по свечению разряда в вакууме с помощью трансформатора Тесла, электрическая схема которого представлена на рис. 4.21.

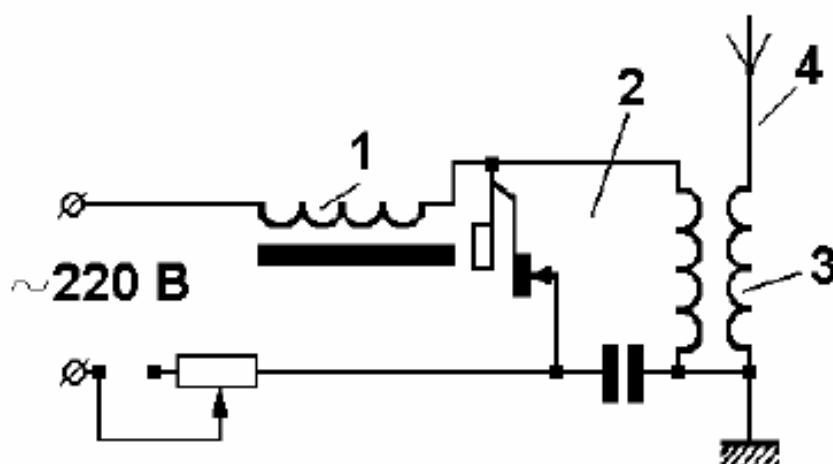


Рис. 4.21

3. При давлениях ниже  $10^{-3}$  Торр наличие «течи» может быть определено с помощью таких веществ, как эфир, четыреххлористый углерод и др. Для этого необходимо облить место предполагаемой "течи" жидкостью, фиксируя при этом показания манометра высокого вакуума (ионизационный манометр). При наличии в этом месте «течи» давление в системе резко уменьшится, а через некоторое время восстановится до прежнего значения. Такое поведение связано с тем, что жидкость при расширении резко охлаждается и закупоривает на некоторое время отверстие «течи».

4. При газовыделении из материалов, находящихся в вакуумной системе, в процессе откачки происходит все же медленное понижение давления вследствие обезгаживания, что не наблюдается при наличии «течи».

5. При наличии «течи» в системе, не откачиваемой в течение длительного времени, давление достигает атмосферного значения, что может быть зафиксировано по звуку в форвакуумном насосе при его включении.

## 5. Физические основы создания стационарных магнитных полей и техника их измерений

Магнитные системы с постоянной напряженностью магнитного поля широко используются в различных областях научных исследований и промышленного производства. Особое место в научных исследованиях занимают вопросы по изучению явлений, возникающих при взаимодействии магнитных полей с объектами исследований в различных областях: атомной и ядерной физики, физической электроники, физики плазмы, радиоэлектроники, электротехники, а также ряде других естественных наук (биология, химия и др.).

Как известно из курса общей физики, источниками макроскопических магнитостатических полей являются проводники с током (движущиеся заряды) и намагниченные тела.

Количественной характеристикой магнитного поля является физическая величина – напряженность магнитного поля): 
$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{i[d\vec{l}\vec{r}]}{r^3}.$$

Единицы измерения напряженности магнитного поля в системе СИ – 1 А/м, в системе СГС – 1 Эрстед (1Э – 79, 5775 А/м).

Силовой характеристикой магнитного поля является величина индукции магнитного поля. Связь между векторами напряженности ( $H$ ) и индукции магнитного поля ( $B$ ):  $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1.26 \cdot 10^{-6}$  Генри/метр (в СГС  $\mu_0 = 1$ ). Единицы индукции магнитного поля в системе СИ – 1 Тл, в системе СГС – 1 Гс (1 Тл –  $10^4$  Гс).

Магнитное поле проявляет себя при взаимодействии с электрическим током (движущимся зарядом):

- При взаимодействии с током сила определяется из соотношения:  $\vec{F} = i[\vec{l}\vec{B}]$  (рис. 5.1, а);
- При взаимодействии с движущимся зарядом сила (сила Лоренца) определяется из соотношения:  $\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}]$  (рис. 5.1, б)

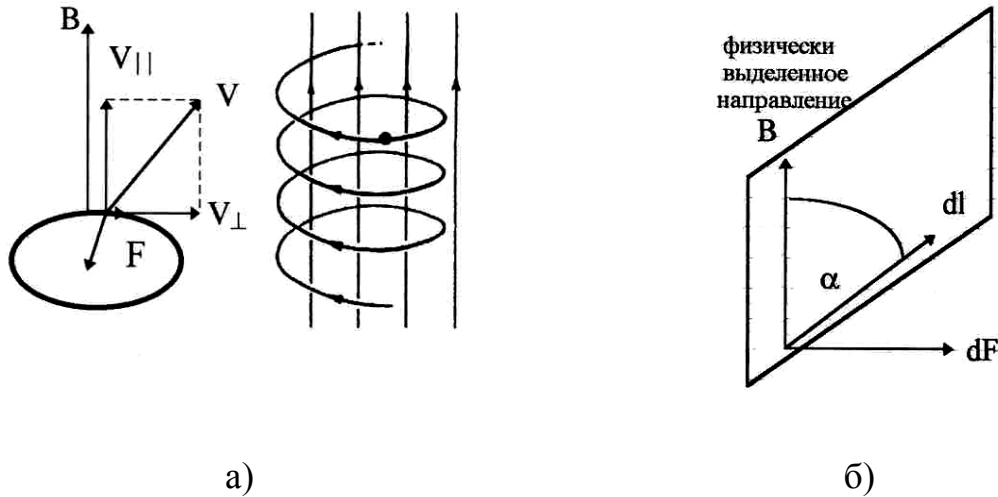


Рис. 5.1

Принято следующее условное деление магнитных полей по величине напряженности:

- слабые – до 500 Э;
- средние в диапазоне от 500 Э до 40 кЭ;
- сильные от 40 кЭ до 1 МЭ;
- сверхсильные свыше 1 МЭ.

Для наглядного представления о таком разбиении на рис. 5.2 в логарифмическом масштабе представлена шкала напряженностей магнитных полей, находящихся в сфере интересов современной науки, достигнутые пределы измерений и максимально полученных значений в лабораторных условия.

Ввиду многообразия областей применения магнитных полей особое место в настоящем курсе уделено физическим основам и методам создания

магнитных полей (стационарных и импульсных), а также физическим основам и технике их измерений.

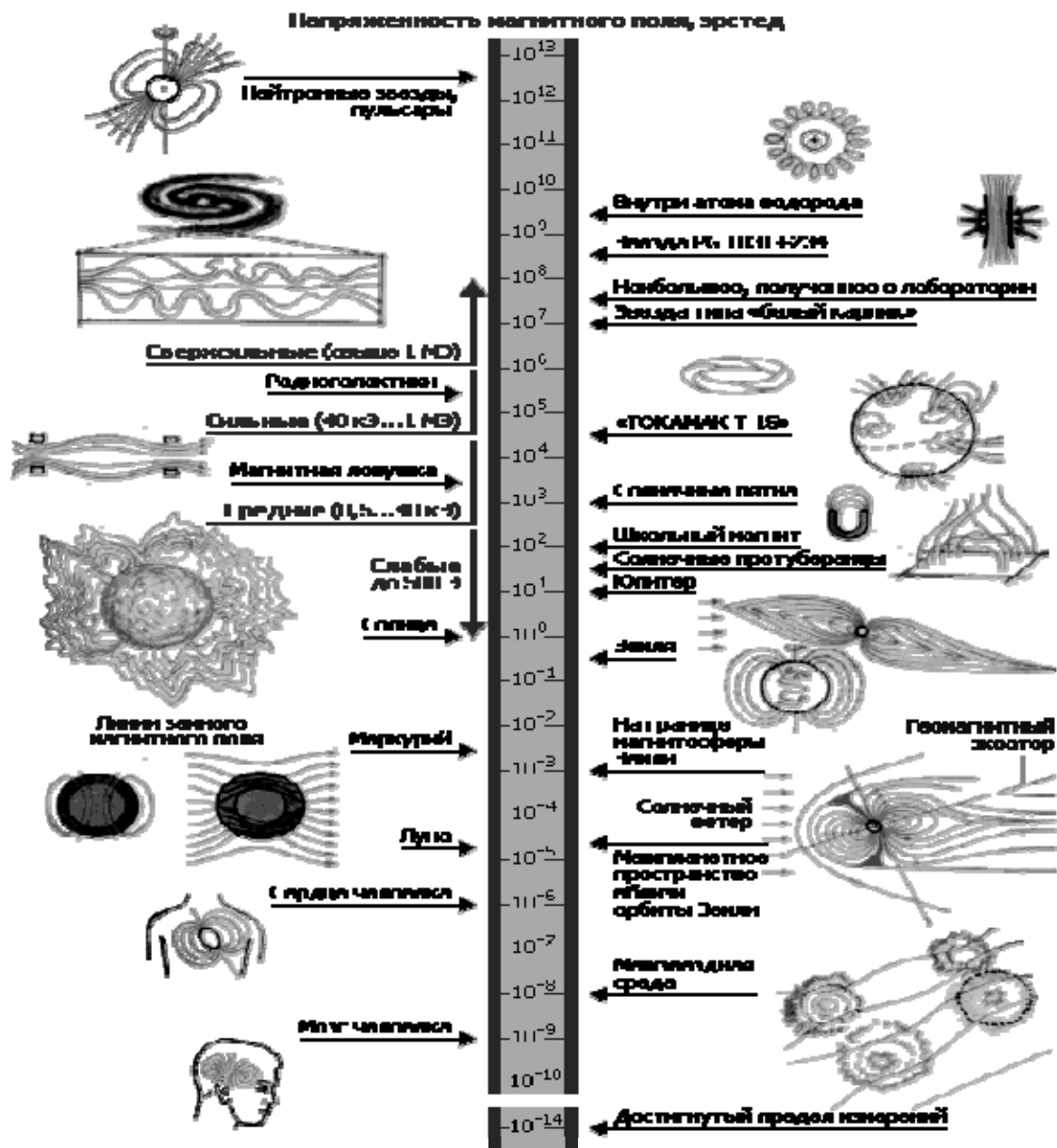


Рис.5.2

### 5.1. Способы создания магнитного поля

Простейшим устройством, создающим магнитное поле, является проводник с током (рис. 5.3, а). Направление магнитного поля определяется по правилу правого винта. В случае прямого бесконечного длинного проводника индукция создаваемого магнитного поля

определяется соотношением:  $B = \mu_0 \frac{1}{2\pi r} I$ , где  $I$  – величина тока;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $r$  – расстояние до проводника.

Если проводник согнуть в кольцо радиуса  $R$  (рис.5.3, б), то поле в центре кольца можно найти с помощью выражения:  $B = \mu_0 \frac{1}{2R}$ .



Рис. 5.3

Это поле является неоднородным вдоль оси кольца. Однако если рядом с первым кольцом (витком) соосно расположить второе, то, подобрав расстояние между витками, можно получить достаточно протяженную область пространства, где магнитная индукция постоянна (катушки Гельмгольца, см. ниже). На рис.5.4, а пунктиром показано распределение индукции поля вдоль оси для каждого витка в отдельности, а сплошной линией – индукция результирующего поля двух соосных витков с током, а также направление силовых линий магнитного поля прямого соленоида (рис.5.4, б).

Используя понятие циркуляции, легко показать, что магнитное поле вне бесконечно длинного тонкого соленоида равно нулю, а внутри определяется соотношением:  $H=In$ , где  $n=N/L$  - число витков на единицу длины соленоида.



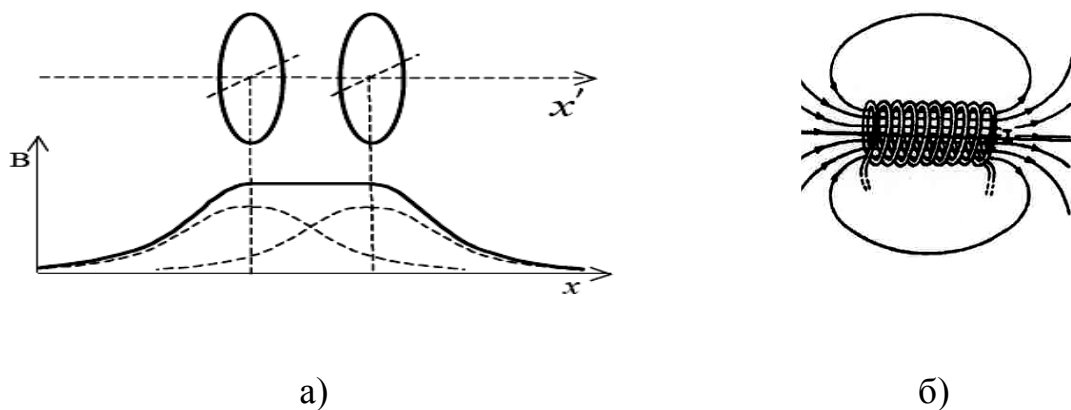


Рис. 5.4

Наиболее распространенными и широко применяемыми источниками стационарного магнитного поля являются: соленоиды (многовитковые с постоянной плотностью тока, спиральные - плоские и геликоидальные), электромагниты, а также постоянные магниты на основе сплавов и соединений редкоземельных металлов.

Выбор того или иного источника магнитного поля определяется прежде всего следующими основными параметрами: объем, в котором необходимо создать поле, максимальное значение его напряженности, а также его пространственная топология.

В целом соленоиды с постоянной плотностью тока для создания стационарного магнитного поля делятся на резистивные («теплые») и сверхпроводящие. Данные источники поля и по сей день являются предметом анализа современной науки, а области их применения непрерывно расширяются.

Рассмотрим толстый многослойный соленоид (рис. 5.5). Соленоиды такого типа очень широко применяются в исследовательской практике. Обмотка такого соленоида представляет собой многослойную катушку,

намотанную на каркас прямоугольного сечения изолированным проводом постоянного сечения.

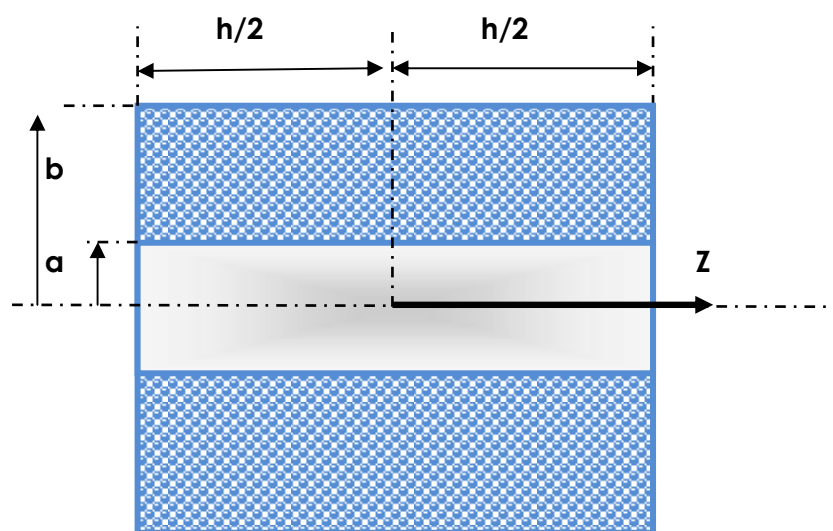


Рис. 5.5

Азимутальный ток, протекающий в катушке, характеризуется усредненной по сечению катушки плотностью тока  $\lambda j$ . Здесь  $j$  – плотность тока в каждом из  $N$  витков, составляющих обмотку;  $\lambda$  – коэффициент заполнения, определяемый как отношение объема проводника к объему намотки. Для достижения максимально возможного коэффициента заполнения необходимо использовать провод прямоугольного сечения, и в этом случае величина коэффициента заполнения может быть определена следующим образом:

$$\lambda = \frac{\text{площадь поперечного сечения, занимаемого проводником}}{\text{поперечное сечение каркаса катушки}} = \frac{NS}{h(b-a)}, \quad (5.1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения провода намотки,  $h$  – ширина катушки;  $a$  и  $b$  – внутренний и внешний радиусы катушки соответственно.

Величина магнитной индукции в центре соленоида определяется:

$$B = \mu_0 \lambda j a \beta \ln \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}}, \text{ где } \alpha = \frac{b}{a}, \beta = \frac{h}{a}.$$

Выражение для аксиальной составляющей поля соленоида в любой точке вдоль оси  $Z$  имеет вид:

$$H(z) = \frac{NI}{2h} \left\{ \left( \frac{h}{2} + z \right) \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + \left( \frac{h}{2} + z \right)^2}}{a + \sqrt{a^2 + \left( \frac{h}{2} + z \right)^2}} + \left( \frac{h}{2} - z \right) \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + \left( \frac{h}{2} - z \right)^2}}{a + \sqrt{a^2 + \left( \frac{h}{2} - z \right)^2}} \right\},$$

(5.2)

где  $z=0$  соответствует геометрическому центру соленоида.

Из формулы (5.2) следует, что поле с определенным значением напряженности можно получить при произвольном значении тока при соответствующем выборе числа витков, так как оно зависит от геометрических размеров катушки и подводимой мощности. Эту мощность можно подвести как к катушке с малым числом витков при большом токе и низком напряжении, так и к катушке с большим числом витков при малом токе и высоком напряжении. Выбор определяется соображениями, связанными с источником питания (его мощностью) и конструкцией катушки. Если же требуется получить максимальное поле от источника питания ограниченной мощности, то необходимо согласовать сопротивление соленоида с источником тока.

В случае использования резистивного («теплого») соленоида, как источника магнитного поля, важен правильный выбор конкретной конструкции катушки, оптимальной с точки зрения конкретного

физического эксперимента. Выбор определяется рядом требований: значение величины напряженности магнитного поля, его пространственное распределение, наименьшая потребляемая мощность, наименьший нагрев проводника. В данном случае пренебрегать теплоотводом нельзя, так как в ряде случаев мощность отвода тепла (жидкостное или криогенное охлаждение) сравнима с мощностью, необходимой для обеспечения питания соленоида. Требования, предъявляемые к другим элементам цепи (источнику питания, подводным системами), в данном случае рассматривать не будем.

Если пренебречь изменением активного сопротивления проводника соленоида, то магнитную индукцию создаваемого поля можно напрямую связать с подводимой электрической мощностью:

$$B = \mu_0 G(\alpha, \beta) \left( \frac{P\lambda}{\rho a} \right)^{1/2} \quad (5.3)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление проводника катушки,  $G(\alpha, \beta)$  - коэффициент (фактор Фабри), зависящий только от геометрии катушки:

$$G(\alpha, \beta) = (2\pi)^{-1/2} \left( \frac{\beta}{\alpha^2 - 1} \right)^{1/2} \ln \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}}.$$

Для разумных конструкций катушек величина  $G(\alpha, \beta)$  находится в диапазоне 0.15 – 0.25. Для оптимизированной катушки этот фактор должен составлять  $G(\alpha, \beta) = 0.179$ , что достигается у соленоидов с размерами  $\alpha = 3$ ,  $\beta = 2$ . При заданной подводимой мощности, согласно (5.3), соленоид с указанными параметрами обеспечивает создание магнитного поля с максимальной напряженностью. В этом случае необходимое число витков составляет:

$$N^2 = \frac{2R\lambda\alpha}{\rho} \frac{\beta(\alpha-1)}{\pi(\alpha+1)},$$

(5.4)

где  $R$  – сопротивление катушки (Ом);  $\rho$  – удельное сопротивление провода намотки (Ом·м);  $\lambda$  – коэффициент заполнения;  $\alpha, \beta$  – параметры, учитывающие геометрические размеры катушки. Сопротивление соленоида с фиксированным числом витков не зависит от формы поперечного сечения провода, использованного при намотке, если коэффициент заполнения остается постоянным.

Обычные соленоиды позволяют получать магнитные поля с индукцией до 0,2 Тл, с охлаждением до 10 Тл, сверхпроводящие – до 100 Тл (обмотка из сверхпроводящих материалов). В последнем случае в короткозамкнутом режиме соленоида мощность, затрачиваемая в подводящих проводах, может быть вообще исключена. Описанные способы создания магнитных полей с использованием соленоидов достаточно широко применяются в различных областях науки и техники. В качестве примера можно привести разработанный для прикладных исследований в лаборатории электронной кинетики Института физики твердого тела РАН рекордный сверхпроводящий ( $T = 4.2$  К) соленоид с магнитным полем 18 Т.

Другим подходом к генерации квазистационарных магнитных полей является применение спиральных соленоидов (рис. 5.6, а). В таких конструкциях реализуется эффективное использование подводимой электрической мощности путем увеличения плотности тока в приосевой области соленоида. Такого эффекта добиваются в соленоидах с неоднородным распределением тока. Наиболее распространенными типами таких соленоидов являются спиральные соленоиды Биттера, Фонера

(рис.5.6, б). Такие конструкции обеспечивают более эффективное использование подводимой электрической мощности по сравнению с обычным многовитковым соленоидом. В соленоиде Биттера, разрезанные по радиусу тонкие медные диски, разрезы которых повернуты друг относительно друга на небольшой угол, разделены тонким изолирующим материалом (в первичном варианте – слюда). Диски сжимаются и соединяются электрически внахлест, и таким образом образуется непрерывная проводящая геликоидальная спираль (жирная стрелка на рис. 5.6, б). Сборка имеет продольные сквозные каналы для обеспечения жидкостного охлаждения.

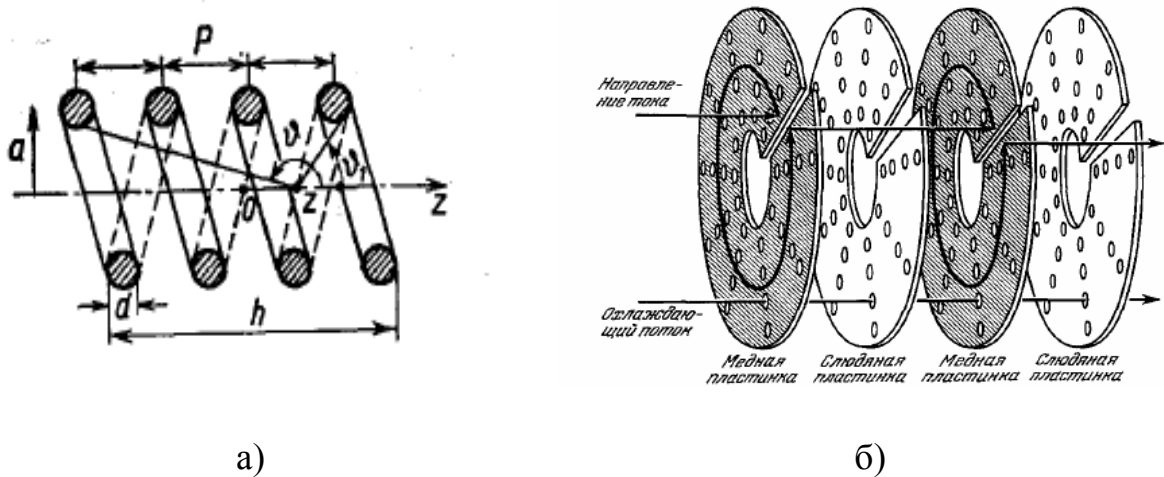


Рис. 5.6

При неоднородном распределении постоянного тока, когда плотность тока по диску распределена неравномерно, его значение на внутренней части диска максимально –  $j_0$  и уменьшается к периферии по закону  $j = j_0 \frac{a}{r}$  (справедливо для спирального и биттеровского соленоида).

В этом случае фактор Фабри равен:

$$G(\alpha, \beta) = 0.2 \left( \frac{\pi}{\beta \ln \alpha} \right)^{1/2} \ln \frac{\beta + (1 + \beta^2)^{1/2}}{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}} \alpha$$

и достигает значения  $G(\alpha, \beta) = 0.209$

при размерах соленоида:  $\alpha = 6$ ,  $\beta = 2$ . Таким образом, в соленоидах такого

типа согласно (5.3) можно получить значение магнитной индукции практически на 20% большее, нежели в многослойном многовитковом соленоиде, однако при этом пространственная однородность магнитного поля ухудшается.

Способ изготовления соленоидов такого типа – токарная обработка цилиндрической заготовки результатом которой являются либо шайбы биттеровского соленоида, либо однослойная точеная спираль.

Известно, что если в катушку, по которой течет ток, вставить железный или стальной сердечник, то магнитное поле такой катушки существенно изменится. Это объясняется тем, что железо (сталь) является магнетиком, т.е. обладает способностью под действием магнитного поля намагничиваться. Намагничивание магнетика характеризуется магнитным моментом единицы его объема; эту величину называют вектором намагничения  $J$ . В изотропных магнетиках вектор намагничения пропорционален значению напряженности магнитного поля:  $J = \chi \mu_0 H$ ,  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества. Намагниченное вещество создает свое магнитное поле, которое накладывается на внешнее поле  $B_0$ . Таким образом, поле в ферромагнетике может быть записано как:

$$B = B_0 + \chi B_0 = \mu B_0 = \mu \mu_0 H, \quad (5.5)$$

где  $\mu = (1 + \chi)$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника  $H$  – напряженность магнитного поля, равная:  $H = B_0 / \mu_0$ .

Магнитная восприимчивость ферромагнетиков  $\chi > 0$  и достигает значительных величин  $10^4 - 10^5$ . На рис. 5.7 представлена зависимость  $\chi(H)$ .

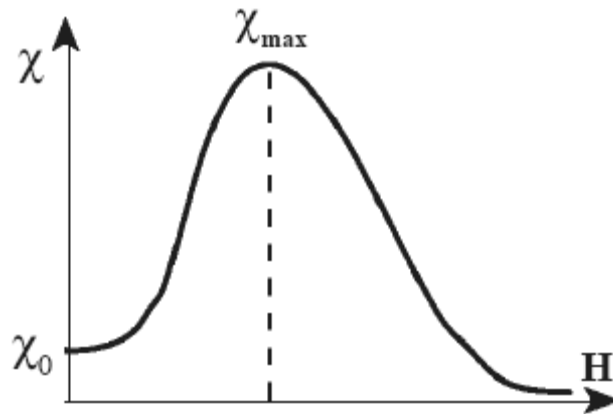


Рис. 5.7

Видно, что с увеличением напряженности поля восприимчивость возрастает, достигая своего максимального значения, дальнейшее увеличение напряженности поля приводит к ее уменьшению, вплоть до значений, соответствующих слабым магнетикам.

Простейший электромагнит представляет собой многовитковый соленоид, намотанный на тороидальный сердечник, изготовленный из ферромагнетика. В соответствии с (5.5) внутри замкнутого сердечника с обмоткой индукция в  $\mu$  раз больше, чем в обмотке без сердечника при том же значении тока. При узком поперечном разрезе сердечника индукция в зазоре практически не изменится. Магнитное поле в зазоре может быть использовано как область с заранее определенными значениями напряженности поля и ее пространственного распределения, зависящего от формы полюсных наконечников.

Рассмотрим электромагнит (рис.5.8, а):  $\ell$  – длина сердечника;  $\ell_j$  – ширина зазора;  $N$  – число витков в обмотке;  $I$  – ток в обмотке.



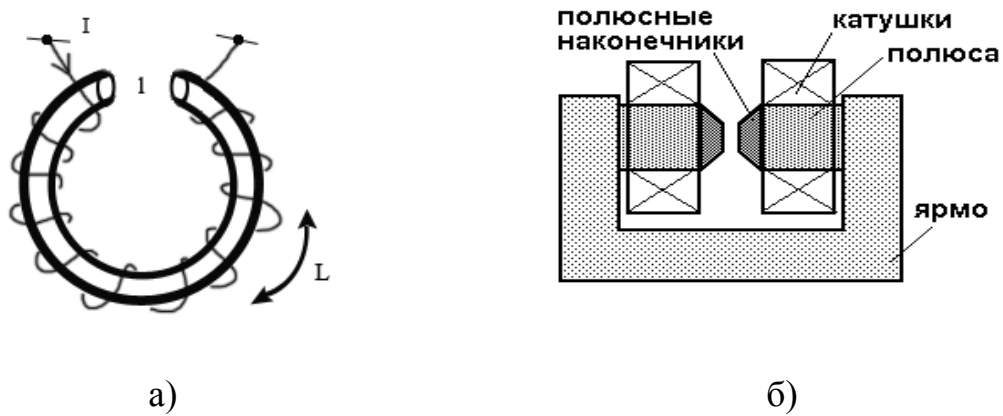


Рис. 5.8

В соответствии с законом полного тока для такого электромагнита можно записать:

$$NI = H\ell + H_{\gamma}\ell_{\gamma}. \quad (5.6)$$

где  $H$  – напряженность в сердечнике,  $H_{\gamma}$  – напряженность в зазоре.

Пренебрегая рассеянием магнитного потока  $\Phi = const$ , и полагая таким образом, что  $B = B_{\gamma}$  имеем

$$NI = \frac{B}{\mu_0} \left( \frac{\ell}{\mu} + \ell_{\gamma} \right). \quad (5.7)$$

$$\text{Откуда } B_{\gamma} = \frac{\mu_0 NI}{(\ell/\mu) + \ell_{\gamma}}. \quad (5.8)$$

Если зазор мал, а длина сердечника  $\ell$  велика, то  $(\ell/\mu) \gg \ell_{\gamma}$ , а из соотношения (5.8) следует, что величина индукции в зазоре будет составлять:

$$B_{\gamma} = \frac{\mu_0 \mu NI}{\ell} = \mu \mu_0 nI, \quad (5.9)$$

где  $n$  – число витков на единицу длины сердечника.

Видно, что величина магнитной индукции в зазоре электромагнита в  $\mu$  раз больше, чем у обычного длинного соленоида. Если же  $(\ell/\mu) \ll \ell_\gamma$ , то из (5.8) следует:  $B_\gamma = \frac{\mu_0 NI}{\ell_\gamma}$ . Это означает, что величина индукции в зазоре тем больше, чем уже этот зазор.

Относительная проницаемость  $\mu$  является функцией напряженности поля  $H$  (рис. 5.8). В этом случае величина  $B$  согласно (5.5) будет расти практически линейно до значения  $H_{нас}$ , которой ферромагнетик насыщается. Для железа типа «армко», из которого обычно делают сердечники электромагнитов, индукция насыщения  $B_{нас} = 2,1$  Тл при максимальном значении  $\mu = 5200$ .

Основными конструктивными элементами наиболее распространенных электромагнитов Вейсовского типа являются: железные цилиндрические полюса с плотно насаженными многослойными катушками, полюсные наконечники разнообразной формы, концентратор магнитного потока - магнитопровод (ярмо), замыкающий магнитный поток, плотно скрепленный с полюсами электромагнита (рис.5.8, б).

Типичные параметры средних электромагнитов:

- размеры  $0.5 \times 0.5 \times 1$  м,
- масса от 400 кг до 1 т,
- диаметр полюсов 10–20 см,
- потребляемая мощность менее 10 кВт.

Для создания постоянных магнитов часто используются материалы, способные сильно намагничиваться в магнитном поле (ферромагнетики). К ним относятся железо, никель, кобальт и их соединения и сплавы. Магнитная проницаемость ферромагнетиков по порядку величины лежит в

пределах  $10^2-10^5$ . Например, у стали  $\mu \approx 8000$ , у сплава железа с никелем магнитная проницаемость достигает значений 250000.

Кроме нелинейной зависимости между индукцией  $B_0$  внешнего поля, индукцией  $B$  магнитного поля в ферромагнетике, для ферромагнетиков характерно наличие явления гистерезиса, т.е. зависимость намагничивания от предыстории образца (рис. 5.9). Это явление заключается в том, что процесс намагничивания ферромагнетика необратим в большей своей части, поэтому кривая намагничивания не совпадает с кривой размагничивания.

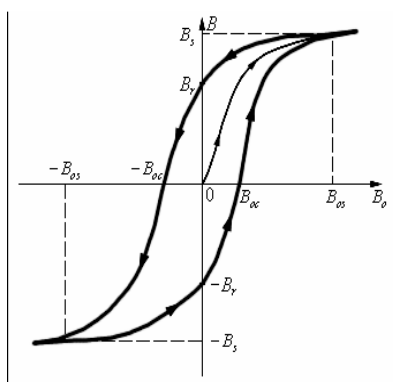


Рис. 5.9

На рисунке стрелками указано направление процессов намагничивания и размагничивания ферромагнитного образца при изменении индукции внешнего магнитного поля. При  $|B_0| > B_{0s}$  намагничённость образца достигает максимального значения (насыщение). При уменьшении индукции  $B_0$  внешнего поля до нуля ферромагнетик сохранит остаточную намагничённость. Таким образом, поле внутри образца будет равно  $B_r$ , что позволяет создавать постоянные магниты. Для размагничивания, необходимо изменить знак внешнего поля и увеличить магнитную индукцию внешнего поля до значения  $-B_{0c}$ , которое принято называть коэрцитивной силой. Процесс перемангничивания указан стрелками (рис. 5.9).

Магнитные материалы обладают различными значениями коэрцитивной силы: магнито-мягкие материалы петля гистерезиса «узкая», значения  $B_{0C}$  невелики у магнито-жестких как раз наоборот. Созданный в результате намагничивания постоянный магнит наиболее устойчив к изменению внешних условий, чем больше величина коэрцитивной силы материала, из которой он изготовлен.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура  $T_K$ , при которой вещество утрачивает ферромагнитные свойства (становится парамагнетиком). Эта температура называется точкой Кюри. К примеру, у железа температура Кюри равна  $770\text{ }^\circ\text{C}$ , у кобальта  $1130\text{ }^\circ\text{C}$ , у никеля  $360\text{ }^\circ\text{C}$ .

Следует также отметить, что наряду с необходимостью создания магнитных полей достаточно часто при проведении экспериментальных исследований необходимо проводить экранирование измерительной аппаратуры от существующих магнитных полей. Такого эффекта добиваются путем применения экранирующей защиты, материал и геометрические параметры которой зависят от степени необходимой экранировки. В геометрии полого шара, принято считать, что

$$H_{int} = \frac{1}{1 + \frac{2(\mu - 1)^2}{9\mu} \left[ 1 - \left( \frac{r_i}{r_e} \right)^2 \right]} H_{ext}, \quad (5.10)$$

где  $H_{int}$  - напряженность поля в сфере с наружным и внутренним радиусами –  $r_e$ ,  $r_i$  соответственно, а  $H_{ext}$  напряженность внешнего поля. В особых случаях эффективная экранировка достигается с помощью слоистого панцыря из материалов с различными значениями  $\mu$ . Величина магнитной проницаемости применяемых материалов в такой конструкции должна увеличиваться в направлении от внешних слоев к внутренним.

## 5.2. Магнитные системы на основе соленоидов

Пространственные структуры стационарных магнитных полей, применяемых в экспериментальных исследованиях, достаточно разнообразны. Наиболее часто реализуемыми являются: 1) однородные конфигурации магнитного поля; 2) зеркальные («пробочные») конфигурации; 3) конфигурации с полем, нарастающим к периферии («остроугольная геометрия», «касп-геометрия»).

Если две одинаковые катушки (витка) расположить друг от друга на расстоянии, равном их радиусу, то получим систему, известную как катушки Гельмгольца, структура поля которых представлена на рис. 5.10.

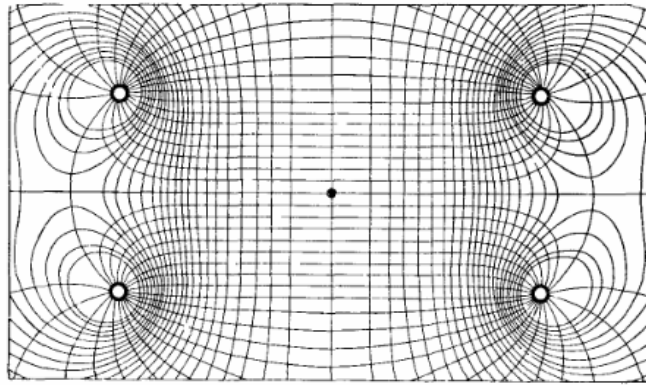
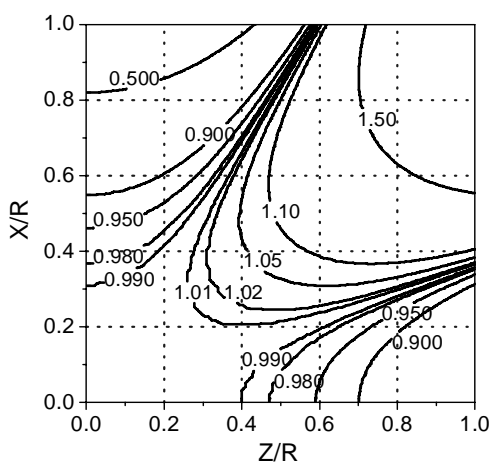


Рис. 5.10

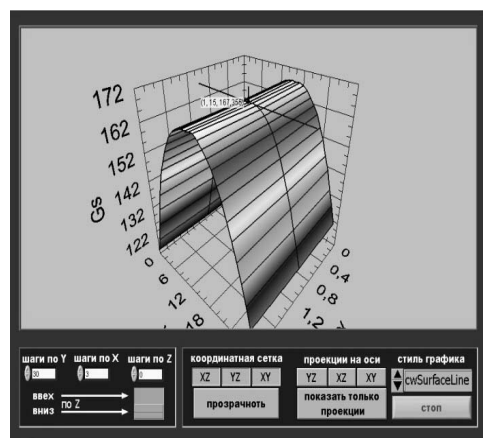
В этом случае в пространстве между катушками продольная составляющая магнитного поля будет квазиоднородной, причем однородность поля может быть не хуже 1%. Распределение поля вблизи центра системы Гельмгольца описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 B_z &= B_{z_0} \left\{ 1 - \frac{18}{125} \left[ 3 \left( \frac{x}{R} \right)^4 - 24 \left( \frac{x}{R} \right)^2 \left( \frac{z}{R} \right)^2 + 8 \left( \frac{z}{R} \right)^4 \right] + \dots \right\}, \\
 B_x &= B_{z_0} \left\{ \frac{72}{125} \frac{xz}{R^2} \left[ 4 \left( \frac{z}{R} \right)^2 - 3 \left( \frac{x}{R} \right)^2 \right] + \dots \right\}, \\
 B_{z_0} &= 0,715 \mu_0 \frac{I}{R} = kI.
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Кривые постоянного отклонения величины поля от значения поля в центре катушки, рассчитанные по формулам (5.11), представлены на рис. 5.11.



а)



б)

Рис.5.11

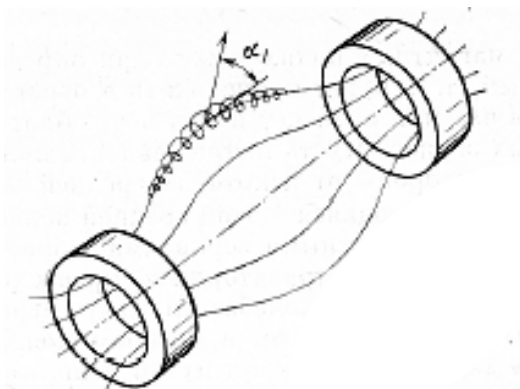
Видно, что при определенном диаметре катушек имеется значительная область однородного поля. На рис. 5.11,б приведено истинное распределение индукции магнитного поля катушек Гельмгольца измеренное с помощью 2D манипулятора .

Катушки Гельмгольца широко применяются в лабораторной практике для точной калибровки магнитных датчиков и зондов, для создания небольших – от 0,01 до 0,03 Тл – однородных полей.

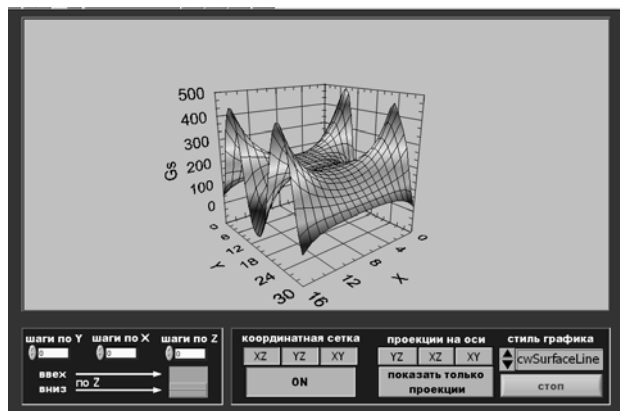
Экспериментальные исследования катушек Гельмгольца на государственном эталоне ГЭТ 44-73 (ВНИИФТРИ) показали, что расхождения между значениями напряженности магнитного поля, воспроизводимыми ими и эталоном, не превышают  $\pm 0,7\%$ .

Рассмотрим ловушку пробочного типа. На рис. 5.12 приведена схематическая картина силовых линий магнитного поля. Магнитное поле

в ловушках такого типа, как правило, обладает аксиальной симметрией и симметрично относительно средней плоскости.



а)



б)

Рис. 5.12

Характерной особенностью рассматриваемой конфигурации магнитного поля является наличие области слабого магнитного поля в средней части ловушки и усиленного поля в пробках. Кроме того, величина магнитной индукции в этом случае убывает по радиусу. В простейшем случае можно полагать, что напряженность магнитного поля в центральной части ловушки изменяется вдоль силовой линии по квадратичному закону:

$$B(z) = B_{\min} \left( 1 + \frac{z^2}{q^2} \right), \quad (5.12)$$

где  $q$  – некоторая постоянная, характеризующая пространственный масштаб неоднородности магнитного поля;  $B$  – величина магнитного поля в центре ловушки.

Более точно продольное распределение магнитного поля в ловушке описывается выражением:

$$B(z) = \frac{1}{2} B_{\min} \left[ (R+1) - (R-1) \cos \frac{\pi z}{L} \right], \quad (5.13)$$

где координата  $z$  отсчитывается вдоль оси системы;  $L$  – половина длины ловушки;  $R = (B_{\max}/B_{\min})$  – пробочное отношение.

В случае аксиально-симметричного поля можно достаточно точно определить величину его напряженности в любой точке пространства магнитной ловушки. Для этого при известной зависимости величины магнитного поля на оси ловушки  $B(z,0)$  для нахождения  $B_z(z,r)$  и  $B_r(z,r)$  следует воспользоваться следующими разложениями этих величин:

$$B_z(z,r) = B(z,0) - \frac{r^2}{4} B''(z,0) + \dots + (-1)^n \frac{1}{(n!)^2} \left(\frac{r}{2}\right)^{2n} \frac{d^{2n} B(z,0)}{dz^{2n}},$$

$$B_r(z,r) = -\frac{r}{2} B'(z,0) + \frac{r^3}{4} B'''(z,0) - \dots + (-1)^n \frac{1}{(n-1)!n!} \left(\frac{r}{2}\right)^{2n-1} \frac{d^{(2n-1)} B(z,0)}{dz^{(2n-1)}}. \quad (5.14)$$

Рассмотрим теперь ловушку типа «касп», в которой напряженность магнитного поля возрастает от центра к периферии по всем направлениям. Простейший вариант такой системы – это две одинаковые соосные катушки с противоположным направлением тока в них (рис. 5.13).

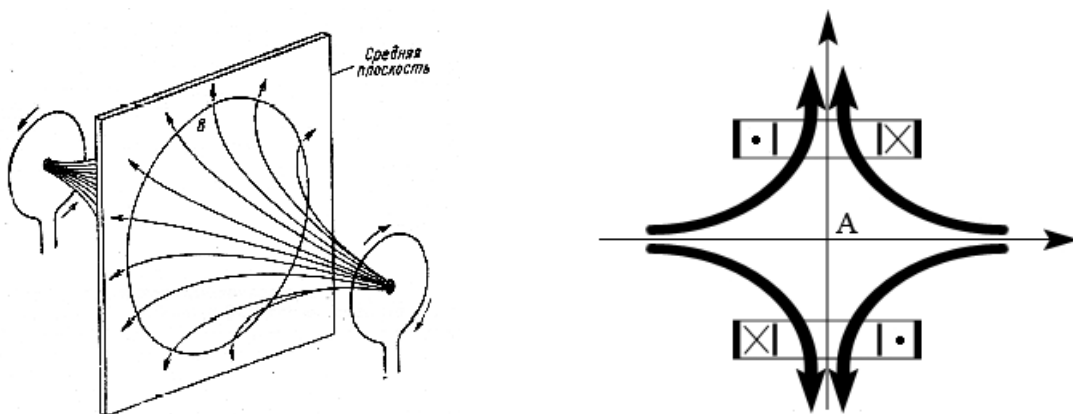


Рис. 5.13



В средней плоскости между катушками, на оси системы (в окрестности точки  $A$ ) магнитное поле равно нулю.

Напряженность поля вдоль оси в окрестности точки  $A$  может быть представлена рядом

$$H = Q_1 z + Q_2 z^2 + \dots \quad (5.15)$$

Структура поля вблизи точки  $A$  характеризуется следующими простыми соотношениями:

$$H_z = a_1 z, H_r = -\frac{a_2}{2} r \quad (5.16)$$

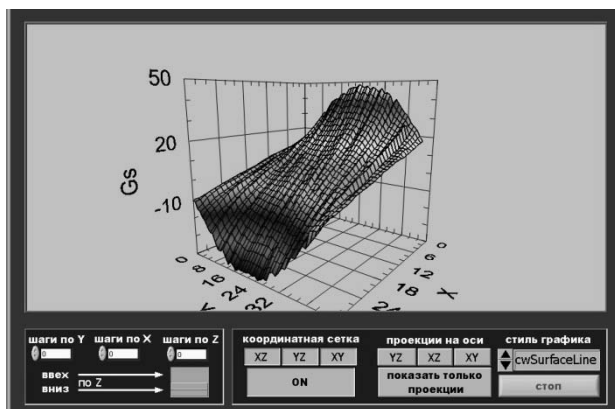
Таким образом, в этой области составляющие поля линейно нарастают с удалением от центра ловушки. Форма силовых линий определяется дифференциальным уравнением  $\frac{dr}{dz} = \frac{H_r}{H_z}$ . Подставляя сюда

$H_z$  и  $H_r$  из (5.16), легко определить, что в окрестности точки  $A$  форма силовой линии описывается выражением:

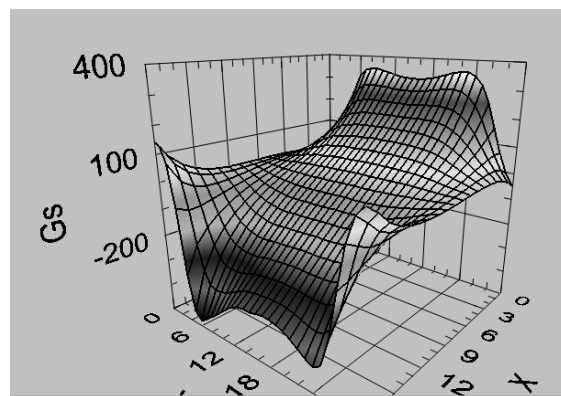
$$r = C/\sqrt{z}, \quad (5.17)$$

где  $C$  – постоянная.

В реальных системах выражения (5.16) и (5.17) характеризуют только некоторую ограниченную область поля вблизи геометрического центра, а поведение  $B_z$  и  $B_r$  на больших расстояниях от  $A$  зависит от размеров, расположения и формы катушек или магнитов (рис. 5.14), являющихся источниками поля.



а) магнитное поле двух катушек  
постоянного тока



б) магнитное поле двух кольцевых  
постоянных магнитов

Рис. 5.14

Возможен такой случай, когда в некоторой точке на оси  $z$  обращается в нуль не только величина  $B_z$ , но и ее производные. Это будет иметь место при обращении в нуль коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  и т.д. В частности, если  $a_1 = 0$ , но  $a_2 \neq 0$ , то вблизи центра ловушки  $B_r$  будут иметь вид:

$$B_z = a_2 \left( z^2 - \frac{1}{2} r^2 \right); B_r = -a_2 z r. \quad (5.18)$$

Таким образом, путем надлежащего выбора элементов магнитной системы можно обратить в нуль коэффициенты при более высоких степенях, тем самым можно создать поле, еще быстрее ослабевающее при приближении к точке  $A$ .

### 5.3. Методы измерения стационарных магнитных полей

В принципе любой физический эффект, зависимость которого от магнитного поля хорошо известна, может быть использован для измерения величины магнитного поля. Действительно, количество методов,

используемых для достаточно точного измерения магнитных полей, весьма велико, к примеру: метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР); метод, использующий эффект Холла; метод, основанный на зависимости омического сопротивления от магнитного поля; оптические методы, использующие эффект Фарадея (поворот плоскости поляризации светового луча в магнитном поле) и Зеемана (расщепление линий излучения атомов в магнитном поле).

Метод ЯМР позволяет в случае однородного магнитного поля производить абсолютные измерения с высокой точностью ( $10^{-4} - 10^{-6}$ ). Метод Холла в диапазоне от  $10^{-2}$  Т до 1 Т позволяет достичь точности порядка нескольких процентов. Оптические методы относительно просты и обеспечивают достаточно высокий уровень точности.

Как известно, метод ЯМР достаточно широко применяется для исследования структуры и динамических свойств веществ, кроме того его используют для прецизионного определения параметров магнитных полей. Точность измерений определяется степенью однородности изучаемого поля, а также скоростью его изменения.

Данный метод относится к резонансным методам исследования, так как основан на явлении резонансного поглощения энергии электромагнитного высокочастотного поля, системой атомных ядер, находящихся во внешнем магнитном поле. Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, которые обладают спином (собственным механическим моментом). Многие ядра обладают также отличным от нуля полным механическим моментом количества движения  $J$ . Кроме того, такие ядра имеют также магнитный момент  $\mu$ , причем для векторов  $\mu$  и  $J$  справедливо:  $\mu = \gamma J$ , где  $\gamma$  - скалярная величина, называемая гиромагнитным отношением.

Согласно классической интерпретации ЯМР, поведение системы спинов в скрещенных магнитных полях (постоянном магнитном поле  $H_0$  и переменном поле  $H_1(t)$ , направленном перпендикулярно постоянному полю) рассматривают через движение суммарного вектора намагниченности  $M$ .

При помещении образца диамагнитного вещества, ядра которого имеют магнитные дипольные моменты, в постоянное магнитное поле суммарный вектор намагниченности  $M$  начнет прецессировать вокруг направления вектора напряженности приложенного магнитного поля. Частота прецессии определяется в данном случае следующим выражением:

$\omega = \gamma \cdot H_0$ , где  $\omega$  – круговая частота прецессии,  $\gamma$  - гиромагнитное отношение ядра.

В тоже время если поместить образец в катушку индуктивности, являющуюся элементом контура генератора высокой частоты, создающего магнитное поле  $H_1(t)$ , перпендикулярное полю  $H_0$ , то при изменении частоты генератора наступает условие резонанса, проявляющееся в поглощении энергии высокочастотного магнитного поля ядрами рабочего вещества. Величина индукции поля  $B_0$  связана с частотой генератора следующим простым соотношением:  $B = \frac{2\pi}{\gamma} \mu f$

В качестве первоосновы чувствительных элементов ЯМР-магнитометров используются магнитоактивные ядра. Для ядер, у которых спин равен нулю, т.е. четное число протонов и нейтронов, наблюдать ЯМР невозможно. Наблюдение ЯМР возможно для ядер с полуцелым или целым спином, т.е. для ядер с четным количеством протонов и нечетным количеством нейтронов, а также для ядер с нечетным числом протонов и нечетным числом нейтронов.

Основными блоками ЯМР-магнитометра являются: генератор, создающий зондирующее поле  $H_I(t)$ , датчик (соответствующий диапазону измеряемого магнитного поля), в котором под воздействием  $B_0$  и  $B_1$  в образце возникает сигнал ЯМР; детектор и приемник, усиливающий резонансный сигнал; система индикации измерений.

Рассмотрим другой метод измерения магнитного поля, использующий эффект Холла. Известно, что если пластину, по которой течет ток, поместить в магнитное поле, то в поперечном направлении пластины возникнет разность потенциалов. Устройство датчика Холла схематично показано на рис. 5.15.

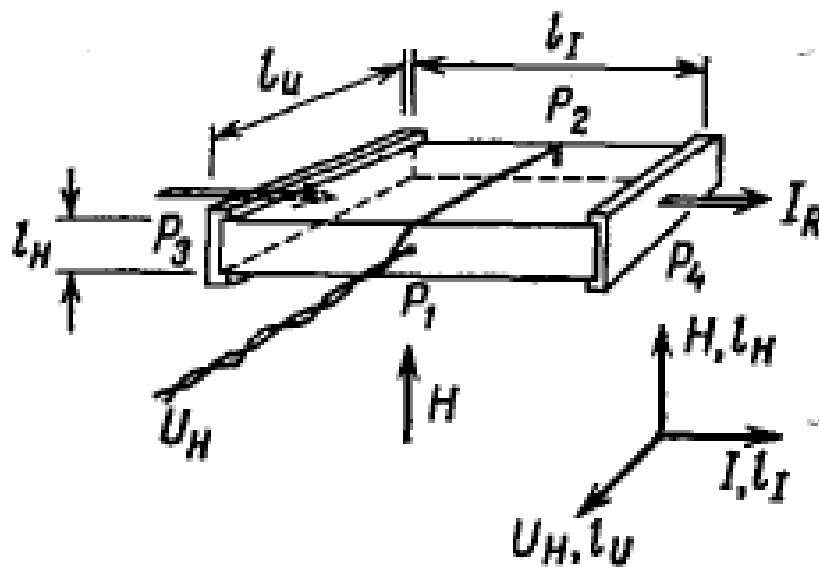


Рис. 5.15

Если направление тока  $I_R$ , магнитного поля  $H$  и возникающей разности потенциалов  $U_H$  взаимно перпендикулярны, то холловское напряжение равно:  $U_H = \frac{R_H}{l_H} I_R B = \frac{R_H}{\rho} \frac{l_n}{l_i} U_R B$ , где  $R_H$  – постоянная Холла;  $I_R$

– ток, протекающий через пластину;  $B = \mu H$  – магнитная индукция;  $U_R$  – приложенное к пластинке напряжение;  $\rho$  – удельное сопротивление;  $\ell_H$ ,  $\ell_i$ ,  $\ell_n$  – размеры пластины вдоль соответствующих направлений.

Поскольку холловское напряжение пропорционально приложенному магнитному полю, этот эффект может быть использован для измерения магнитного поля.

Чувствительность холловского датчика зависит от тока  $I$ . Типичные размеры датчиков:  $\ell_H \approx 0,1$  мм,  $\ell_i \approx 5$  мм,  $\ell_n \approx 5$  мм, однако в некоторых случаях размеры могут быть значительно меньше (несколько квадратных миллиметров), что дает возможность получать хорошее пространственное разрешение.

## 6. Импульсные магнитные поля

Генерация электромагнитных полей, временной характер которых отличен от простых временных зависимостей (синусоидальные или экспоненциальные) представляет серьезную инженерно-физическую задачу.

Проблема генерации мощных импульсов тока для получения импульсных магнитных полей (ИМП) в первую очередь сводится к созданию подходящих источников энергии, которые должны:

- 1) запастись необходимой энергией;
- 2) преобразовывать и передавать энергию при очень больших ее потоках за короткие времена.

Существуют различные импульсные источники энергии, типичное время разряда которых меняется от долей микросекунды до многих секунд (конденсаторная батарея, механический генератор, индуктивность, аккумулятор и др.).

В данном разделе изучаются наиболее часто реализуемые в физическом эксперименте методы создания импульсного магнитного поля - с помощью конденсаторного накопителя.

Накопление энергии в конденсаторе с последующей передачей в нагрузку является одним из наиболее простых и доступных способов генерации импульсов, однако постоянно совершенствуется путем создания более энергоемких конденсаторов, а также применения современных систем коммутации при помощи средств современной сильноточной электроники.

Принципиальная схема такого подхода достаточно проста (рис.6.1, *a*) и обеспечивает генерацию ИМП с максимальной энергией  $Q = \frac{L_L I_{\max}^2}{2}$ , где  $L_L$  - индуктивность нагрузки, а  $I_{\max}$  - максимальное значение тока в ней.

Электрические схемы питания соленоидов, генерирующих ИМП, а конкретнее узла коммутирующих устройств, обеспечивающих подключение и энергообмен между соленоидом и емкостным накопителем, существенным образом зависят от необходимой временной зависимости напряженности магнитного поля.

### **6.1. Системы с конденсаторным накопителем**

Наиболее простым и распространенным методом создания импульсного магнитного поля является прямой разряд конденсаторной батареи через соленоид. В этом случае ток разряда конденсаторной батареи  $R$  проходит через цепь, состоящую из последовательно соединенных емкости  $C$ , индуктивности  $L = L_s + L_L$  и сопротивления  $R$  (рис. 6.1, *a*).

Везде в тексте используются единицы СИ, за исключением случаев, которые отмечены особо.

Как известно из курса общей физики, дифференциальное уравнение для тока  $I$ , текущего в такой цепи имеет вид:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = 0 \quad (6.1)$$



Вид решения этого уравнения зависит от величины параметра  $\gamma = \frac{1}{2}R\sqrt{C/L}$  (параметр затухания). На рис. 6.1, б представлена временная зависимость тока разряда для различных значений  $\gamma$ .

Видно, что при  $0 < \gamma < 1$  ток разряда носит колебательный характер, при  $\gamma > 1$  – аperiodический, т.е. ток в цепи не меняет направление. При  $\gamma = 1$  имеет место так называемый случай критического затухания. Чем меньше величина  $\gamma$ , тем больше максимальная амплитуда магнитного поля в соленоиде, которую можно получить в конденсаторе

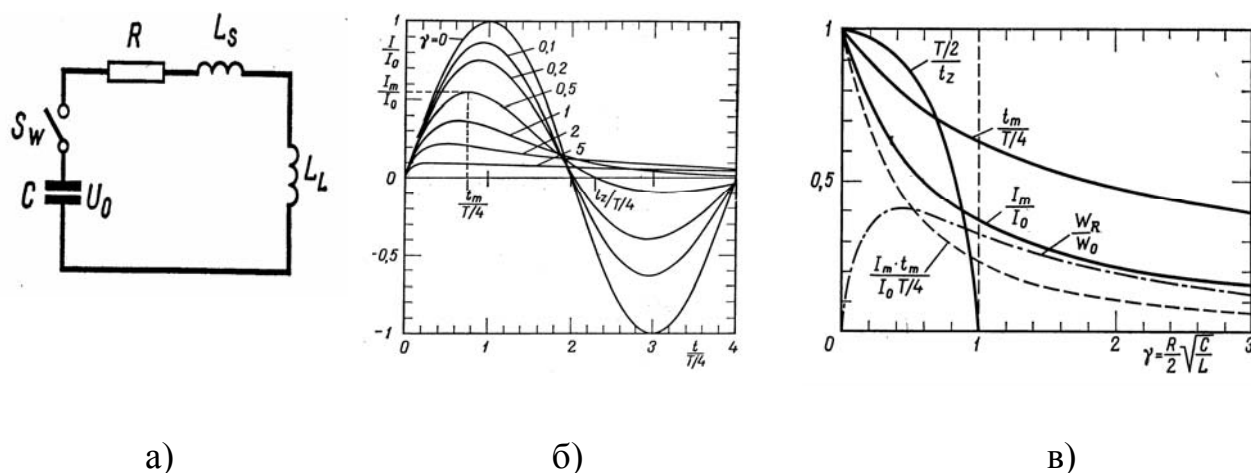


Рис. 6.1

при данной запасенной энергии  $W = \frac{CU_0^2}{2}$ .

В идеализированном случае цепи без потерь ( $R = 0, \gamma = 0$ ) решение уравнения (6.1) имеет вид:

$$I = I_0 \cdot \sin \omega_0 t, \quad (6.2)$$

где  $I_0 = U_0\sqrt{C/L}$  – амплитуда тока в цепи,  $U_0$  – напряжение заряда емкости. Период колебаний в такой цепи равен

$$T = 2\pi/\omega_0 = 2\pi\sqrt{CL}, \quad \text{где } \omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (6.3)$$

При  $0 < \gamma < 1$  решение уравнения (6.1) имеет вид:

$$I = \frac{U_0}{\omega L} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \sin \omega t, \quad \text{где } \omega = \omega_0 \sqrt{1-\gamma^2} \quad (6.4)$$

В случае сильного затухания ( $\gamma > 1$ ) решение уравнения (6.1) имеет вид:

$$I = \frac{U_0}{\omega' L} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \frac{e^{\omega' t} - e^{-\omega' t}}{2}, \quad \text{где } \omega' = \omega_0 \sqrt{\gamma^2 - 1} \quad (6.5)$$

Решение в особом случае  $\gamma = 1$  выглядит следующим образом:

$$I = \frac{U_0}{L} t \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \quad (6.6)$$

При генерации ИМП в разрядных цепях указанного типа с конечным активным сопротивлением наиболее важными характеристиками являются время достижения током своего максимального значения –  $\tau_m$ , а также его величина –  $I_m$ . Графики соответствующих характеристик представлены на рис. 6.1, в. Приведенные зависимости позволяют рассчитать мощность, рассеянную на активном сопротивлении цепи при первичной энергии, запасенной в емкостном накопителе –  $W_0 = \frac{CU_0^2}{2}$ .

## 6.2. Импульсные соленоиды

Импульсные магнитные поля создаются при помощи соленоидов, питаемых импульсным током.

Необходимо отметить, что конструкции соленоида при генерации ИМП, как и упоминавшейся ранее, схемы исполнения коммутирующей

системы определяются конкретными условиями проводимых экспериментов, а именно: максимальное значение поля (тока) и скорость ее достижения, наличие плато (участка с постоянным значением тока), а также временной характер заднего фронта импульса.

Наиболее распространенными типами соленоидов являются:

многовитковые соленоиды, одновитковые соленоиды, спиральные соленоиды.

Основное внимание в данном разделе сосредоточим на рассмотрении вопросов генерации ИМП, на наиболее часто используемой в физических экспериментах конструкции индуктивной нагрузки, а именно на соленоиде с постоянной плотностью тока.

Если заданы: объем, занимаемый полем; требуемая величина поля и мощность источника тока, то путем изменения параметров соленоида можно получить оптимальное решение поставленной задачи.

Эффективность использования энергии емкостного накопителя с точки зрения достижения максимально возможного значения  $Q$  может быть определена с помощью зависимости, представленной на рисунке 6.1,

в и соотношения:  $\frac{Q}{W_0} = \frac{L_L}{L} \left( \frac{I_m}{I_0} \right)^2$ , где  $L = L_s + L_L$  – полная индуктивность цепи, включающая в себя  $L_L$ - индуктивность соленоида,  $L_s$ - индуктивность конденсаторов, передающей линии, коммутаторов и т.п.

Индуктивность соленоида может быть определена следующим образом:

$$L = \mu_0 N^2 \frac{\pi a^2}{h} K_L, \quad (\text{Гн/м}); \quad \mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}, \text{ где величина } K_L$$

определяется геометрией соленоида и задана в виде функции от  $b/a$  и  $h/2a$ . На рис. 6.2 представлено семейство зависимостей коэффициента  $K_L$ .

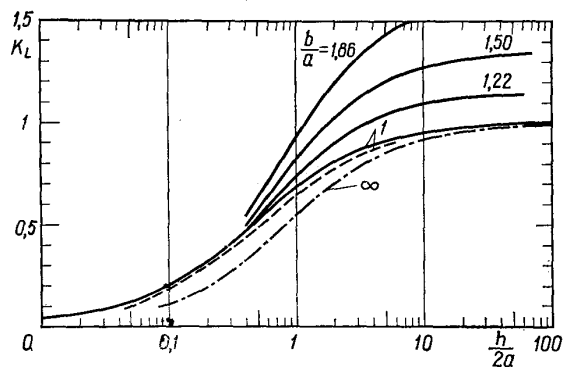


Рис. 6.2

Если плотность тока постоянна по сечению провода  $S_0$  (т.е. толщина скин-слоя велика по сравнению с размерами провода  $\sim \sqrt{S_0}$ ), то сопротивление катушки равно:

$$R_L = \frac{\pi}{\sigma} \cdot \frac{N}{S_0} \cdot (b+a). \quad (6.7)$$

Величина магнитного поля в центральной части соленоида может быть вычислена согласно рекомендациям предыдущего раздела.

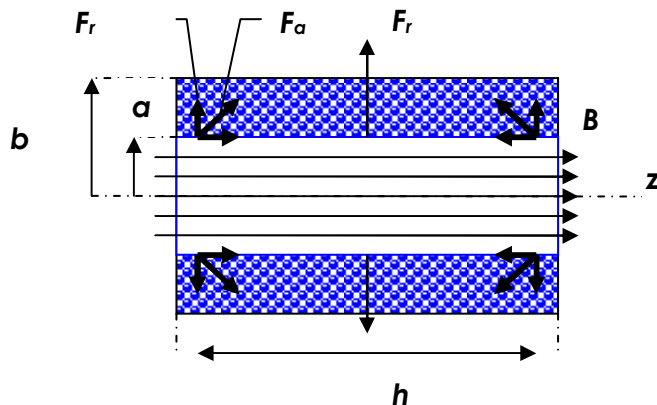


Рис. 6.3

В процессе работы соленоидов в импульсном режиме при протекании значительных токов существенные проблемы связаны с возникающими динамическими нагрузками. В связи с этим актуальной является задача обеспечения механической прочности их конструкции.

Рассмотрим силы, действующие на соленоид в процессе импульса тока. Радиальные силы –  $F_r$  возникают за счет взаимодействия значительной аксиальной составляющей магнитного поля с током, протекающим через соленоид. Радиальная компонента поля  $B_r$  создает силы, стремящиеся сжать соленоид в осевом направлении –  $F_a$ . Эти силы достигают своего максимального значения в средней части соленоида. Расчеты объемных механических нагрузок для различных конструкций, показывают, что аксиальные силы практически на порядок меньше радиальных.

Повышения механической прочности соленоида добиваются применением комбинированного проводника (медная оболочка со стальным керном). В этом случае прочность обмотки соленоида определяется сталью, а проводимость – медью. В качестве дополнительных мер производят армирование обмотки соленоида стекловолокном, пропитанным эпоксидным компаундом, и или изготавливают кожух или бандаж из стали.

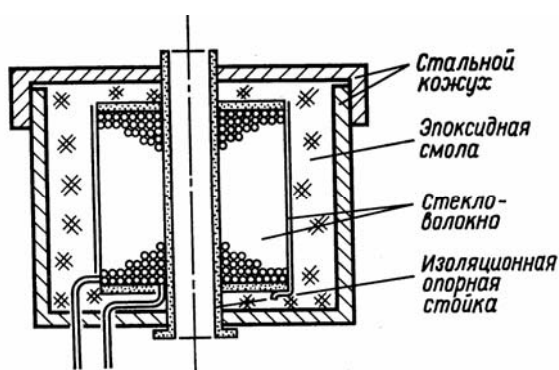


Рис.6.4

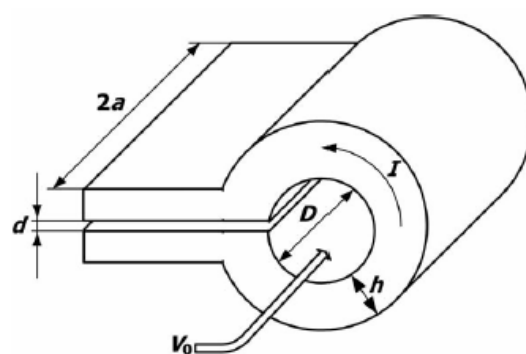


Рис. 6.5

Другим достаточно распространенным типом индуктивной нагрузки являются одновитковые соленоиды (рис. 6.5), которые применяются для генерации ИМП с длительностями микросекундного масштаба.

При малых размерах щели между токоподводящими шинами ( $d \ll D$ ) можно считать виток короткозамкнутым. В таком случае плотность тока имеет только азимутальную составляющую (рис. 6.5).

Распределение тока по сечению витка может быть как сильно неоднородным при  $\alpha \gg 1$  (массивный виток), так и однородным для тонкостенного соленоида, где  $\alpha = \frac{R}{r}$ .

Поле в геометрическом центре соленоида можно рассчитать согласно выражения :  $B = 0.4\pi\mu_0 \frac{I_{\max}\beta}{D} K_L(\alpha, \beta)$ , где  $\beta = \frac{2a}{r}$ ,  $K_L(\alpha, \beta) < 1$  геометрический фактор.

### 6.3. Диффузия импульсного поля в полый проводник

Достаточно часто при проведении экспериментальных исследований возникает необходимость эффективного проникновения ИМП в полый проводник. Как известно, проникновение синусоидального во времени поля внутрь проводника описывается экспоненциальной функцией, содержащей характерную длину, называемую глубиной скин-слоя, т.е. глубину, на которой поле внутри проводника уменьшается в  $e$  раз по сравнению с его значением на поверхности проводника. Глубина скин-слоя  $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$  зависит от удельного сопротивления проводника  $\rho$ , его магнитной проницаемости  $\mu$  и круговой частоты  $\omega$ .

Рассмотрим процесс диффузии аксиального переменного во времени магнитного поля во внутренний объем тонкой проводящей трубки (рис. 6.6):  $H_{ext}(t)$  – внешнее магнитное поле;  $H_{int}(t)$  – внутреннее магнитное поле;  $r_0$  – средний радиус цилиндра;  $d$  – толщина стенок проводника.

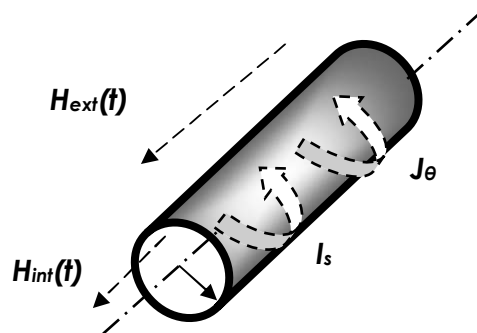


Рис. 6.6

В расчетах необходимо учесть, что процесс диффузии происходит с конечной скоростью, которая определяет время достижения магнитным полем своего максимального значения, а также это значение. В случае синусоидального внешнего поля толщина скин-слоя магнитного потока –  $S_\varphi$  для первой четверти периода определяется следующим образом:

$$S_\varphi = \frac{1}{2} \delta.$$

С точки зрения физического эксперимента наибольший интерес представляют максимальное значение индукции магнитного поля, прориффундировавшего в проводящую полость –  $B_{max}$ , и время его достижения.

Очевидным фактом является то, что темп нарастания магнитного поля внутри проводящего цилиндра запаздывает по отношению к току в катушках. Условие проникновения медленно меняющегося магнитного поля в полый проводник сводится к малости толщины стенок цилиндра  $d$  по сравнению с толщиной скин-слоя  $S_\varphi$ , т.е.  $d \ll S_\varphi$ . В этом случае

уравнение диффузии имеет вид:  $\tau_0 \frac{dH_i}{dt} + H_i = H_e$ , где  $\tau_0 = r_0 d / 2\alpha_0$  – характерное время;  $\alpha_0$  – коэффициент магнитной диффузии;  $\alpha_0 = (\sigma_0 \mu_0)^{-1}$ ;  $\sigma_0$  – удельная проводимость;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость.

В случае, когда магнитное поле имеет вид синусоидальной функции  $H_e = H_0 \sin \omega t$ ;  $0 \leq t \leq \infty$ ,  $H_e = 0$  для  $t = 0$ , решение уравнения для первой четверти периода колебания поля имеет вид:

$$H_i = H_0 \exp\left(-\frac{T}{4\tau_0}\right) + H_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_0^2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right), \text{ где } \operatorname{tg} \varphi = \omega \tau_0.$$

На рисунке 6.7а изображены зависимости безразмерной максимальной амплитуды диффузионного поля -  $\left(\frac{H_i}{H_0}\right)_m$  от постоянной времени -  $\frac{\tau_0}{T/4}$ , а также (рис.6.7, б) безразмерной величины, характеризующей время достижения диффузионным магнитным полем своего максимального значения -  $\frac{t_m}{T/4}$ , при  $d < S_\varphi$ , где  $H_c = \left(\frac{4d}{\mu_0 \lambda r_0}\right)^{1/2}$  - характеристическое поле,  $\lambda$  - тепловой коэффициент.

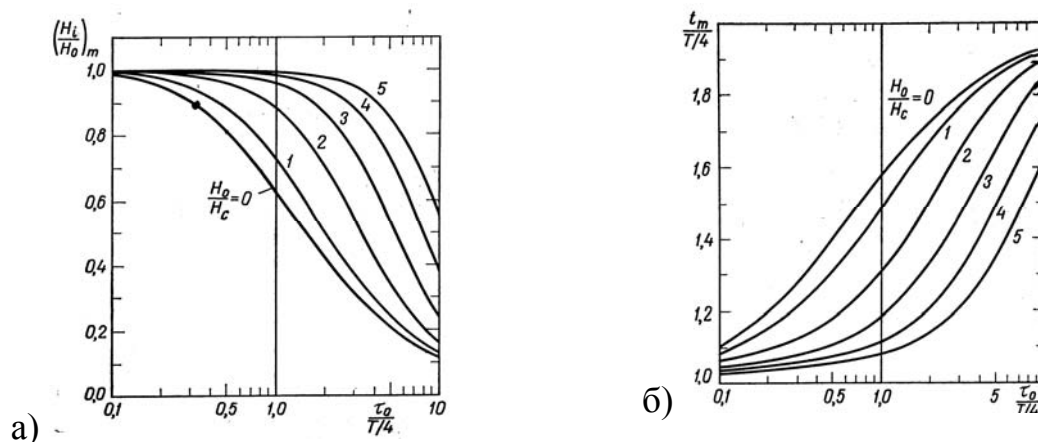


Рис. 6.7



Использование представленных зависимостей позволяет спрогнозировать порядок измеряемых величин или по результатам измерений характеристик ИМП определить величины, влияющие на процесс диффузии.

#### 6.4. Методы измерения импульсного магнитного поля и тока

Наиболее распространенным методом измерения меняющегося во времени магнитного поля является индуктивный магнитный датчик. На рис. 6.8 представлена типичная конструкция индуктивного датчика.

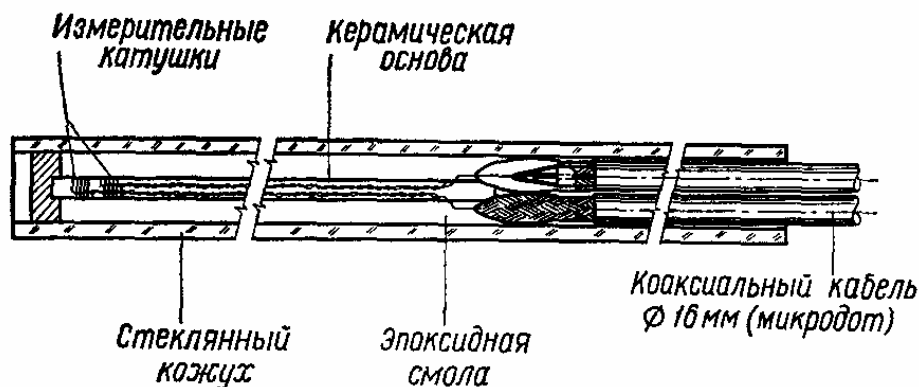


Рис. 6.8

Датчик – это катушка, которая помещается в исследуемое магнитное поле так, чтобы поперечное сечение витков было перпендикулярно направлению вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ . Тогда, если по катушке не течет ток, она будет являться источником ЭДС индукции:

$$\varepsilon_u = -\frac{d\Phi}{dt} = -S_g N_g \mu_0 \frac{dH}{dt}, \text{ где } S_g \text{ – площадь датчика; } N_g \text{ – число витков.}$$

Для работы с датчиком его выходной сигнал  $\varepsilon_u \sim (dH/dt)$  необходимо преобразовать в напряжение  $U_{\text{вых}} \sim U_{\text{вх}}$ . Эту функцию могут выполнить интегрирующие RC- и RL-цепи (рис. 6.9).

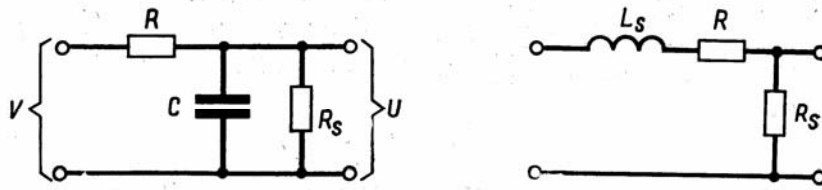


Рис. 6.9

Зависимость напряжения на выходе –  $U_{\text{вых}}$  от напряжения на входе –  $U_{\text{вх}}$  в таких цепях выражается приближенной формулой:  $U_{\text{вых}} = \frac{1}{\tau_{\text{инт}}} \int U_{\text{вх}} dt$ ,

где  $\tau_{\text{инт}}$  – постоянная времени интегрирующей цепи. В случае RC-цепи,

$\tau_{\text{инт}} = CR$ , в случае RL-цепи,  $\tau_{\text{инт}} = L/R$ .

Приближением можно пользоваться, если характерное время изменения входного напряжения  $\tau$  (для гармонического сигнала  $\tau = (1/\omega)$ ) достаточно мало, т.е.  $\tau \ll \tau_{\text{инт}}$ . Сигнал  $U_{\text{вых}}$  считывается с регистрирующего прибора с ошибкой  $\Delta U_{\text{вых}}$ , поэтому полученное

выражение справедливо при  $\left| \frac{1}{\tau_{\text{инт}}} \int U_{\text{вых}} dt \right| < \Delta U_{\text{вых}}$ .

Тогда, учитывая эти предположения, при  $U_{\text{вх}} = \varepsilon_U$  получаем:

$$H = \frac{\tau_{\text{инт}} \cdot 10^8}{S_{\delta} N} \cdot U \text{ [Э, В, сек, см}^2\text{]}.$$

Необходимо отметить, что на катушке связи индуцируется не только ЭДС, связанная с изменением внешнего магнитного поля –  $\varepsilon_U$ , но и ЭДС самоиндукции  $\varepsilon_{LU}$ , связанная с изменением магнитного потока  $\Phi_{\delta} = L_{\delta} I_{\delta}$  где  $I_{\delta}$  – ток через индуктивный датчик и внешнюю интегрирующую цепь. Поэтому при использовании интегрирующей цепи

для того, чтобы  $U_{ex} \approx \varepsilon_U$  необходимо также удовлетворить неравенству:  $\omega L_g \ll R_{инт}$ .

Таким образом, индуктивное сопротивление датчика должно быть существенно меньше активного сопротивления цепи. Отметим, что выполнение этого неравенства одновременно означает обоснованность пренебрежения собственными колебаниями в образовавшемся контуре.

Наиболее широко распространенным типом активных интеграторов является интегратор Миллера – усилитель постоянного тока с отрицательной обратной связью. Такой интегратор функционирует как RC-цепь с последующим усилением сигнала, при этом постоянная времени интегрирования увеличивается в  $K_y + 1$  раз ( $K_y$  - коэффициент усиления).

Для успешного применения датчиков, основанных на эффекте Холла или эффекте зависимости удельного сопротивления от магнитного поля (полупроводники InSb+NiSb) необходимо выполнение требования, чтобы длительность ИМП превышала время диффузии поля в датчик и время релаксации носителей.

С другими методами измерения ИМП, в частности применение для этих целей эффекта Фарадея, Зеемана, а также использование резонансных методов измерений можно познакомиться в соответствующей литературе.

Не менее важным при измерениях ИМП является измерение импульсных токов. Наиболее широко распространенными являются: измерение падения напряжения при протекании тока через хорошо сопротивление (шунт), а также метод пояса Роговского.

Основными тонкостями использования шунтового метода являются учет полного сопротивления (активного и индуктивного) элемента цепи, проявляющегося при высоких частотах. При определенных условиях

индуктивное сопротивление системы шунта может стать больше активного (или сравнимо с ним), что в конечном счете приводит к появлению ошибки, которая проявляется в зависимости измеренного падения напряжения от частоты. Схожая зависимость наблюдается, когда толщина скин-слоя для материала шунта меньше толщины шунта, в этом случае активное сопротивление является функцией частоты. В качестве примера на рис.6.10, а показано устройство малоиндуктивной шунтовой системы (система с параллельными токами), где в качестве материала используется тонкая нихромовая фольга (снижает и температурные эффекты) с толщиной меньше толщины скин-слоя.

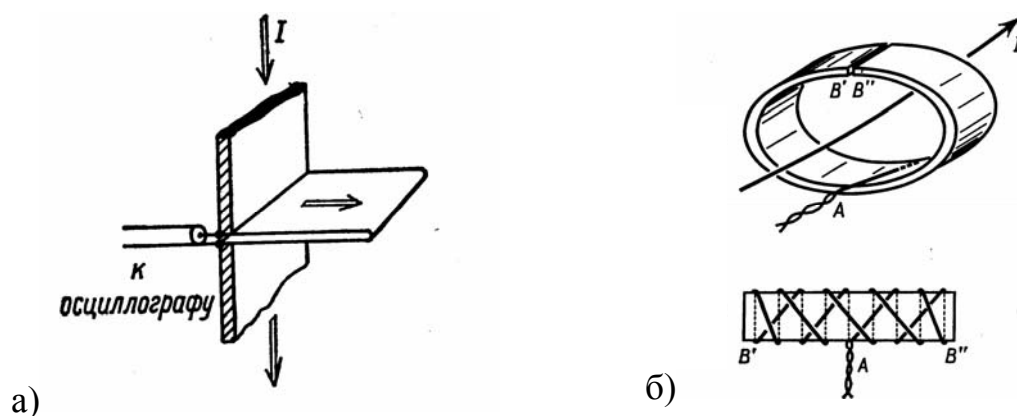


Рис. 6.10.

Другим эффективным методом измерения быстропеременных токов большой величины является пояс Роговского – петля или катушка, охватывающая проводник с током (рис.6.10, б).

Меняющееся магнитное поле вызывает в такой катушке появление электродвижущей силы индукции  $-\frac{d\Phi}{dt}$ . Величину магнитного потока  $\Phi$  можно получить путем интегрирования индуцированной ЭДС, величина которой зависит от тока, создающего магнитное поле. «Электрическое» измерение потока позволяет определить ток, в этом случае выходное

напряжение с такого датчика с простой интегрирующей RC-цепочкой определяется простым соотношением:  $U(t) = \frac{Kn}{RC} I(t)$ . Для облегчения измерений и повышения их точности желательно, чтобы это напряжение было достаточно большим. Повышение выходного напряжения достигается увеличением числа витков в катушке, однако максимальное число витков, предназначенной для измерения токов частоты  $\omega$ , ограничено условием  $\omega L \ll R$ . Условие  $t \ll RC$  также ограничивает увеличение входного напряжения. За исследователем компромиссное решение. Величина  $K$  определяется простым соотношением  $K = \frac{\mu_0 S}{l}$ , где  $l$  – эффективная длина кольцевого соленоида (длина окружности, совпадающей с осью тора),  $S$  - площадь витка соленоида. Величина  $K$  не зависит от положения и распределения тока, проходящего через отверстие тора.

Немаловажным при генерации ИМП является защита (экранировка) измерительной аппаратуры от возникающих значительных наводок различных источников. Выходом из данного положения является применение наиболее часто применяемой общей схемы защиты (рис. 6.11).

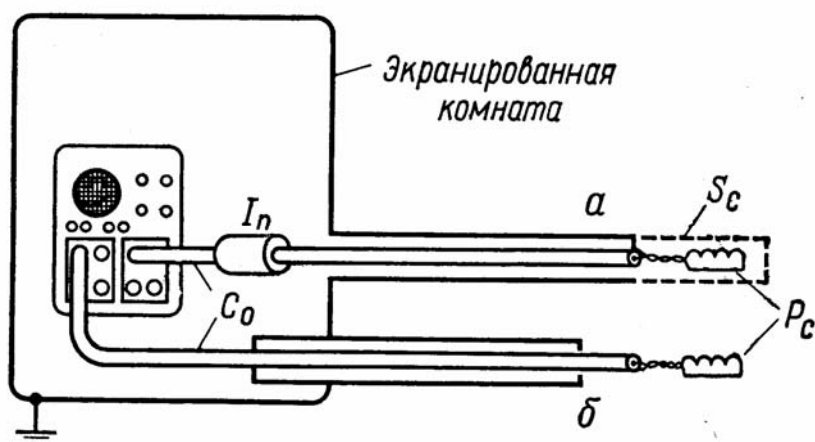


Рис. 6.11

В такой схеме выводы подключения к датчикам плотно скручены, датчик подсоединен к измерительному устройству заземленным коаксиальным кабелем с двойной экранировкой минимальной длины. Измерительные устройства размещаются в заземленном экранированном помещении. В целях исключения индуктивных наводок заземление производится в одной точке.

## 7. Оптические спектральные измерения

### 7.1. Общие вопросы оптической спектроскопии

Спектроскопия – раздел физики, посвященный изучению спектров электромагнитного излучения. В основе спектроскопии лежит взаимодействие излучения с веществом. Рассмотрим оптическую спектроскопию, которую часто называют просто спектроскопией.

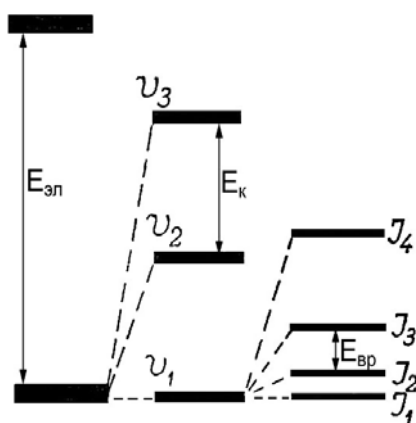


Рис. 7.1. Уровни энергии с учетом колебательно-вращательного движения частиц

Свет – это электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda$  от  $10^{-3}$  до  $10^{-8}$  м. Этот диапазон длин волн включает инфракрасную (ИК), видимую и ультрафиолетовую (УФ) области. Инфракрасный интервал спектра ( $\lambda = 1$  мм - 750 нм) подразделяется на дальнюю (1 мм - 50 мкм), среднюю (50 - 2,5 мкм) и ближнюю (2,5 мкм - 750 нм) области. Видимый спектр простирается от 750 нм (красная граница) до 400 нм (фиолетовая граница). Излучение на этих длинах волн воспринимается человеческим глазом, и именно на эту область приходится большое число спектральных линий атомов. Диапазон от 400 до 200 нм соответствует ультрафиолетовой области, далее примерно до 1 - 10 нм следует вакуумный ультрафиолет.

Каждый атом и молекула имеют уникальное строение, которому соответствует свой соответствующий спектр. Это обусловлено следующими факторами. Вид спектра атома определяется строением электронной оболочки атома и влиянием его ядра, а также внешними факторами – температурой, давлением, магнитным и электрическим полями и т.д.

Согласно квантовой теории, электроны атома могут обладать только строго определенными значениями энергии, которые называются разрешенными. Эти значения энергии называются энергетическими уровнями. Согласно законам квантовой механики, каждый энергетический уровень соответствует определенному квантовому состоянию. Электроны и ядра в таком состоянии совершают характерные периодические движения, для которых энергия строго определена и квантована, т.е. принимает лишь разрешенные дискретные значения, соответствующие целым и полуцелым значениям квантовых чисел.

Переход электрона на более высокий уровень возможен при поглощении энергии извне строго определенной величины, равной разности значений энергий между энергетическими уровнями. В этом случае атом переходит в возбужденное состояние. Возбуждение атома может осуществляться путем воздействия любого вида энергии: тепловой, световой, электрической, магнитной и поглощается энергия строго определенными порциями – квантами. Возвращение атома в исходное (невозбужденное) состояние сопровождается выделением избытка энергии в виде кванта электромагнитного излучения.

В молекулах наряду с движением электронов относительно ядер атомов, составляющих молекулу, происходит колебательное движение самих ядер около их положения равновесия и вращательное движение всей молекулы как целого. Энергетический спектр молекулы имеет более



сложную структуру: каждый электронный уровень расщепляется на ряд колебательных подуровней, а каждый колебательный уровень расщепляется на вращательные подуровни. Энергетический спектр молекулы, таким образом, состоит из далеко отстоящих электронных уровней  $E_{эл}$ , более близко колебательных  $E_{кол}$  и еще более близко вращательных  $E_{вр}$  (рис. 7.1). Переходы между электронными уровнями соответствуют излучению в видимом диапазоне, между колебательными – в инфракрасном диапазоне, а между вращательными – в микроволновом диапазоне.

Если известны силы, связывающие электроны и ядра в единую систему, то можно рассчитать уровни энергии и квантовые числа, а также предсказать интенсивности и частоты спектральных линий. С другой стороны, анализируя спектр конкретной системы, можно определить энергии и квантовые числа состояний, а также сделать выводы относительно действующих в ней сил. Таким образом, спектроскопия является основным источником сведений о строении атомов и молекул.

*Спектральный анализ* – физический метод определения качественного и количественного состава вещества на основе изучения его спектров.

В зависимости от характера исследуемых спектров различают: *эмиссионный* спектральный анализ, при котором по спектру испускания определяется элементарный состав исследуемого вещества и *абсорбционный*, при котором по спектрам поглощения можно определить как элементарный, так и молекулярный состав вещества.

Таким образом спектроскопию можно подразделить на эмиссионную и абсорбционную.

#### *Эмиссионная спектроскопия*

Атомы, находящиеся в возбужденном состоянии  $E_2$ , при возвращении в невозбужденное состояние  $E_1$  излучают энергию  $h\nu$ , равную разности между двумя уровнями, между которыми происходит переход

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu, \quad (7.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  - частота излучения.

Вообще говоря, спектральные переходы могут происходить отнюдь не между всеми парами уровней энергии. Вероятность излучательных переходов различна для разных переходов и зависит от свойств уровней  $E_2$  и  $E_1$ , между которыми происходит квантовый переход. Эта вероятность тем больше, чем сильнее изменяются при переходе электрические и магнитные свойства системы, величина которых определяется дипольным моментом перехода. Электрические дипольные переходы, сопровождающиеся наиболее сильными спектральными проявлениями, имеют место лишь при выполнении определенных условий (правил отбора). Переходы, которые удовлетворяют правилам отбора, называются разрешенными, вероятность остальных переходов значительно меньше, они трудны для наблюдения и считаются запрещенными.

Об атомном составе вещества можно судить по длине волны излучаемого света. Набор линий в спектре каждого химического элемента уникален и этот фактор положен в основу эмиссионной спектроскопии. Экспериментальное исследование эмиссионных спектров дает информацию о длинах волн или частотах спектральных линий, их интенсивности и контурах.

Сравнивая интенсивность излучения спектральных линий, характерных для различных элементов, можно рассчитать их количественное соотношение в веществе и определить его химический состав, т.е. провести спектральный анализ вещества. Однако для проведения такого анализа необходимо обеспечить, с одной стороны, перевод анализируемых материалов из твердого или жидкого состояния в парообразное состояние, т.е. состояние свободных атомов и ионов, а с

другой стороны, обеспечить достаточное возбуждение свечения этих атомов и ионов.

### *Абсорбционная спектроскопия*

В этом случае через исследуемое вещество пропускается широкополосное излучение и выявляются линии поглощения. В широкополосном спектре наблюдаются темные линии поглощения на определенных длинах волн, характерных для данного вещества. По спектру поглощения можно судить о составе вещества.

В спектроскопии для характеристики излучения кроме длины волны  $\lambda$  часто используют частоту  $\nu=c/\lambda$  ( $c$  – скорость света). В инфракрасной спектроскопии пользуются волновым числом, т.е. числом длин волн, укладывающихся в единице длины  $k = 1/\lambda$ . Следует отметить, что частота является более универсальной характеристикой, так как длина волны меняется в оптических средах вследствие изменения скорости света, тогда как частота остается постоянной. Когда нет специальных пояснений, подразумевается длина волны в вакууме или в воздухе, что мало от нее отличается.

### *Лазерная спектроскопия*

Лазерная спектроскопия, основанная на применении лазерного излучения, обладающего специфическими свойствами, такими как когерентность, монохроматичность и другими, позволяет использовать новые методики для исследования атомов, молекул и конденсированных сред.

Большая спектральная яркость, возможность перестройки длины волны излучения, получение мощных сверхкоротких импульсов открыли новые пути в исследовании строения и состава вещества.

Методы спектроскопии основаны на связи поляризации среды  $P$  с напряженностью электрического поля падающей волны  $E$ . Поляризация среды может быть представлена в виде степенного ряда по  $E$ :

$$P_i = \chi_{ij}^{(1)} E_j + \chi_{ijk}^{(2)} E_j E_k + \chi_{ijkl}^{(3)} E_j E_k E_l + \dots, \quad (7.2)$$

где  $\chi_{ij}^{(1)}, \chi_{ijk}^{(2)}, \dots$  - коэффициенты восприимчивости.

В классической спектроскопии используется линейная связь поляризации среды с напряженностью поля падающей волны, когда коэффициент поглощения и показатель преломления не зависят от мощности световой волны. Область применения лазеров в качестве источников излучения в классической спектроскопии относится к *линейной лазерной спектроскопии*.

В линейной лазерной спектроскопии используют монохроматичность и направленность излучения, а методы подобной спектроскопии отличаются способами регистрации сигнала. В абсорбционной лазерной спектроскопии перестраиваемый по длине волны лазер служит одновременно и источником излучения и монохроматором. Например, разработаны диодные лазерные спектрометры с набором полупроводниковых лазеров, работающие в спектральной области от 3 до 30 мкм.

При высокой мощности излучения в поляризацию  $P$  дают вклад нелинейные восприимчивости вещества. Квадратичный член в (7.2) определяет генерацию второй гармоники света, генерацию суммарных и разностных частот в радиодиапазоне. В оптическом диапазоне для большинства сред нелинейная восприимчивость  $\chi^{(2)}$  равна нулю. Кубичный член в (7.2) определяет двухфотонное поглощение, вынужденное комбинационное рассеяние света и др. Нелинейные эффекты, обусловленные кубичным членом, проявляются в простейших

системах – газах и парах. Использование этих эффектов относится к области *нелинейной лазерной спектроскопии*.

## 7.2. Основные оптические схемы спектральных приборов

Решение проблем спектроскопии невозможно без спектральных приборов. В настоящее время происходит непрерывное усовершенствование приборов, направленное на улучшение характеристик приборов. При этом значительную роль играет все более широкое использование компьютерных технологий для управления приборами и обработки информации.

Спектральные приборы предназначены для разложения в спектр по длинам волн (или частотам) электромагнитного излучения оптического диапазона и для исследования этих спектров. Принципиальная оптическая схема спектрального прибора приведена на рис. 7.2.

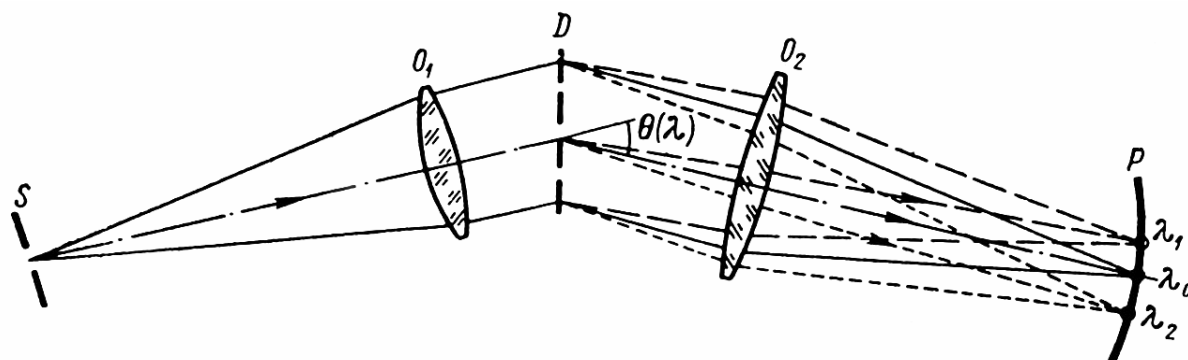


Рис. 7.2. Принципиальная оптическая схема спектрального прибора

Узкая *входная щель*  $S$ , освещаемая исследуемым излучением, устанавливается в фокальной плоскости *коллиматорного объектива*  $O_1$ , который направляет параллельные лучи света от каждой точки щели в *диспергирующее устройство (элемент)*  $D$ , назначение которого пространственно разделить по длинам волн падающее на него излучение

(на рисунке ход лучей показан в плоскости, перпендикулярной щели). Диспергирующее устройство отклоняет лучи на различные углы  $\theta$  в зависимости от длины волны излучения  $\lambda$ . В качестве диспергирующего элемента может служить призма, дифракционная решетка, интерферометр Фабри-Перо, эшелон Майкельсона и др. Фокусирующий объектив  $O_2$  создает на некоторой поверхности  $P$  монохроматическое изображение щели, образуя спектр. Поверхность изображения  $P$  (фокальная плоскость) в общем случае не является плоскостью. В некоторых случаях отдельные элементы оптической схемы могут отсутствовать. Иногда диспергирующий элемент устанавливается не в параллельных лучах, а в расходящихся или сходящихся. Тогда отсутствуют объектив  $O_1$  или объектив  $O_2$ , соответственно. Может отсутствовать входная щель (бесщелевые спектрографы).

Помимо перечисленных выше основных элементов в оптическую схему спектрального прибора входят осветительная часть с источником излучения и приемно-регистрирующая часть с приемником излучения.

По способу разложения в спектр спектральные приборы подразделяются на несколько классов:

1. Спектральные приборы с *пространственным разложением*, в которых излучения различных длин волн разделяются по направлению.
2. Спектральные приборы с *амплитудной модуляцией*, в которых анализ спектра излучения осуществляется за счет изменения разности хода интерферирующих лучей, в результате чего изменяется интенсивность света в заданном направлении в зависимости от длины волны.
3. *Фурье-спектрометры*, в которых непосредственно измеряется интегральное (по длинам волн) излучение как функция разности хода и

разложение в спектр осуществляется Фурье-преобразованием измеренных данных.

4. *Светофильтры*, которые позволяют выделять из исследуемого излучения узкие спектральные участки.

По способу наблюдения и регистрации спектральные приборы можно разделить на следующие типы:

1. *Спектроскопы* – простейшие спектральные приборы, предназначенные для визуального наблюдения спектра.

2. *Спектрографы*. Регистрация спектра осуществляется путем фотографирования на фотопластинку или фотопленку, которые помещаются в фокальной плоскости.

3. *Монохроматоры*. Предназначены для выделения излучения в пределах заданного спектрального интервала. В фокальной плоскости выходного объектива располагается неподвижная щель для вывода излучения.

На основе монохроматоров могут быть сконструированы спектрометры и спектрофотометры. Эти приборы имеют, как правило, встроенные источник света, систему освещения щели и приемно-регистрирующую систему.

В спектрометрах с помощью кинематического механизма получают развертку спектра во времени, который после преобразования его в приемном устройстве регистрируется записывающим устройством.

Спектрофотометры дают возможность получать спектры поглощения исследуемых объектов в шкале прозрачности или оптической плотности. Упрощенные схемы спектрометра (а) и спектрофотометра (б) приведены на рис. 7.3.

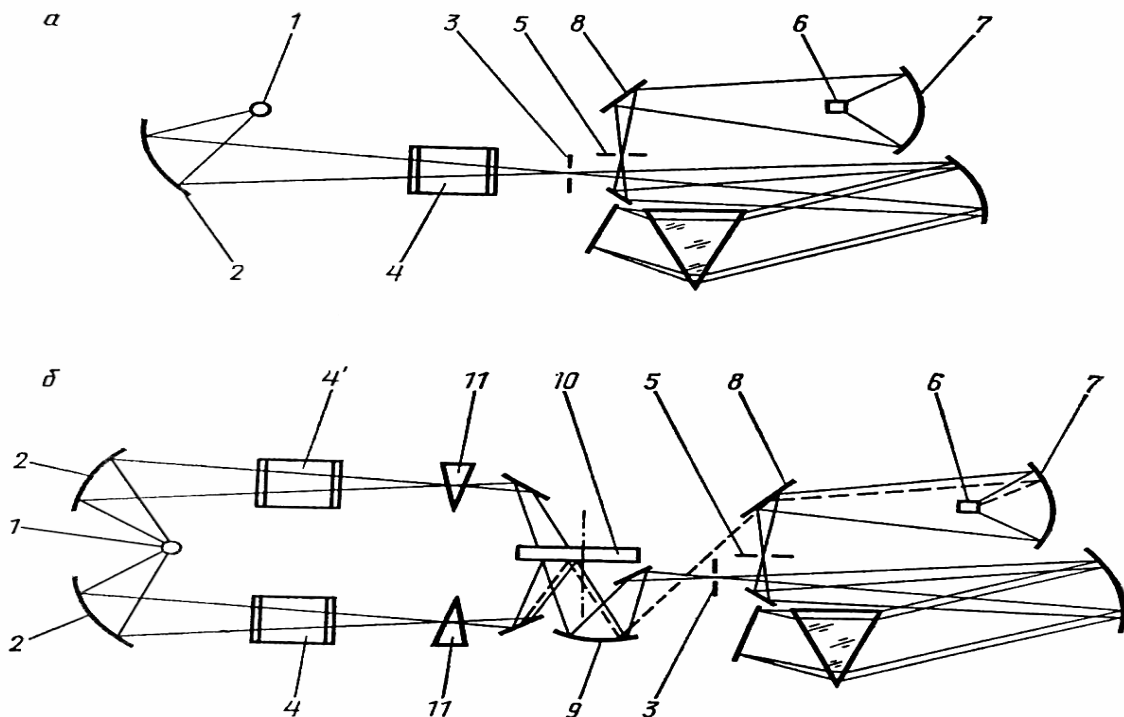


Рис. 7.3. Упрощенные оптические схемы спектрометра (а) и спектрофотометра (б): 1 – источник света; 2 – зеркало осветительной системы; 3 – входная щель; 4 и 4' – кюветы; 5 - выходная щель; 6 – приемник; 7, 9 – вогнутые зеркала; 8 – плоское зеркало; 10 – секторный модулятор; 11 – фотометрический и компенсационный клинья.

### 7.3. Основные спектральные характеристики

К важнейшим спектральным характеристикам спектральных приборов относят следующие: дисперсия (угловая  $d\varphi/d\lambda$  и линейная  $dl/d\lambda$ ); разрешающая способность (разрешающая сила); область дисперсии (для интерференционных приборов) – спектральный интервал, при котором не происходит наложения спектров соседних порядков; светосила.

Спектральный прибор, обладающий большей угловой дисперсией, позволяет более точно измерить длину волны спектральных линий. Разрешающая способность спектрального прибора  $R=\lambda/\delta\lambda$ , где  $\delta\lambda$  - разность двух длин волн, которые еще можно различить (разрешить) с



помощью данного прибора. Величина  $R$  для спектрального прибора определяется его аппаратной функцией, случайными ошибками измерения (шумами) и критерием, который устанавливает, что значит различить две близкие линии в спектре.

*Аппаратная функция.* Каждый тип спектрального прибора характеризуется аппаратной функцией, искажающей регистрируемый спектр. Аппаратная функция представляет собой отклик спектрального прибора на монохроматическое излучение. Аппаратная функция  $a(x)$  спектрального прибора – наблюдаемое распределение энергии в спектре, полученное с данным прибором при монохроматическом излучении; ее форма и ширина определяются дифракцией на апертурных диафрагмах оптической системы, aberrациями фокусирующей оптики, шириной входной и выходной щелей спектрального прибора и др. Наблюдаемое распределение энергии в спектре  $f(\lambda)$  отличается от истинного распределения энергии  $\varphi(\lambda)$  в спектре исследуемого излучения из-за конечной ширины аппаратной функции. Если известна аппаратная функция, оно может быть определено с помощью формулы

$$f(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)a(\lambda - x)dx. \quad (7.3)$$

Спектральный прибор таким образом вносит систематические искажения в наблюдаемый спектр. Так, при регистрации линий излучения ширина наблюдаемой спектральной линии  $\delta$  всегда больше истинной ширины линии  $\gamma$  и  $f_{\max} < \varphi_{\max}$  (рис. 7.4). Величина аппаратных искажений зависит от соотношения между  $\gamma$  и шириной аппаратной функции, а также от формы истинного контура спектральной линии и контура аппаратной функции.

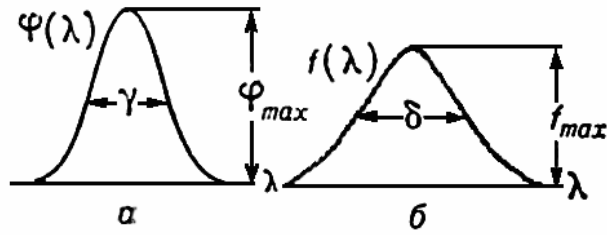


Рис. 7.4. Истинный  $\varphi(\lambda)$  - (а) и наблюдаемый  $f(\lambda)$  - (б) контур спектральной линии

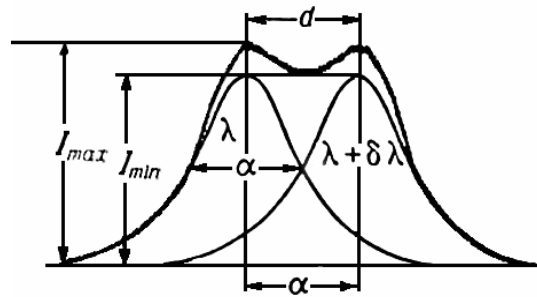


Рис. 7.5. Наблюдаемое распределение интенсивностей в спектре при наложении двух близких длин волн  $\lambda$  и  $\lambda + \delta\lambda$

С учетом аппаратной функции критерий разрешающей способности можно сформулировать следующим образом: две спектральной линии считаются разрешенными, если расстояние между ними  $d$  примерно равно ширине аппаратной функции на полувысоте ее контура. При этом в результирующем распределении будет «провал»  $\Delta = I_{\max} - I_{\min} / I_{\max}$  (рис. 7.5).

*Светосила.* Одной из важнейших характеристик спектрального прибора является светосила, представляющая собой коэффициент пропорциональности в выражении, связывающем фотометрическую величину (освещенность, световой поток), измеряемую приемником оптического прибора, и яркость источника. Во многих случаях измеряемой величиной является освещенность изображения  $E$ . Если апертурная диафрагма круглая (как в большинстве приборов), то

$$E = \pi B \tau \sin^2 u' \quad , \quad (7.4)$$

где  $\tau$  - коэффициент пропускания системы,  $B$  – яркость источника,  $u'$  - апертурный угол объектива, т.е. угол, под которым радиус выходного зрачка объектива виден из центра изображения.

В сложных оптических системах из-за больших потерь вследствие отражения света от поверхности линз и поглощения материалом оптических элементов спектрального прибора коэффициент пропускания  $\tau$  мал и принимают специальные меры для его увеличения, такие как просветление оптики, использование материалов с малым коэффициентом поглощения в заданном спектральном диапазоне и др.

Спектральные приборы, как правило, имеют целевое назначение. Так, для эмиссионного спектрального анализа используются приборы средней дисперсии и невысокой светосилы, так как источники излучения в этом случае обладают большой яркостью. Для исследования спектров слабых свечений необходима в первую очередь большая светосила и т.д.

#### **7.4. Оптические материалы**

К оптическим материалам и средам в зависимости от их назначения предъявляют разнообразные требования. Материалы, используемые для изготовления оптических компонент спектральных приборов, таких как линз, призм, окон должны обладать хорошей прозрачностью в заданном диапазоне длин волн.

При выборе материала для призм решающую роль играют такие свойства, как область прозрачности, значения показателя преломления  $n$  и дисперсии вещества  $dn/d\lambda$ . Призмы, предназначенные для разложения излучения в спектр, должны иметь хорошую дисперсию. С другой стороны, при больших  $n$  велики потери на отражение, что приводит к уменьшению светосилы. Необходимо принимать во внимание и такие

свойства материалов, как двулучепреломление, однородность, возможность механической обработки, влагоустойчивость.

В соответствии с областью прозрачности в разных областях спектра используют различные материалы с оптимальными характеристиками. Так, в видимой и ближней ультрафиолетовой области спектра прозрачны оптические стекла всех марок, но для изготовления призм применяют в основном тяжелые флинты, которые обладают наибольшей дисперсией. В ультрафиолетовой области спектра чаще используют кварц кристаллический и плавленый.

В ближней инфракрасной области спектра прозрачны все стекла (до 2,6 мкм) и кварц (до 3,5 мкм). Далее в порядке сдвига длинноволновой границы области прозрачности в сторону возрастания длины волны следуют кристаллы: LiF, CaF<sub>2</sub>, Ba F<sub>2</sub>, NaCl, KCl, KBr. Длинноволновая граница KBr соответствует

26 мкм. Влагоустойчивы в этом списке кристаллов только фтористые соли.

К зеркалам предъявляется требование высокого коэффициента отражения и минимального поглощения. Для получения зеркал с большим коэффициентом отражения используют многослойные диэлектрические покрытия из чередующихся четвертьволновых слоев с высоким и низким показателем преломления. Коэффициент отражения растет с увеличением количества слоев.

В процессе проведения спектральных исследований излучение на пути от источника к приемнику проходит некоторый путь в воздухе. При этом оно ослабляется за счет поглощения различными газами и парами и рассеивается на различных частицах и в аэрозолях. Так, коротковолновое излучение с длиной волны менее 200 нм поглощается наиболее сильно. Поэтому спектральные приборы, работающие в этой области должны быть вакуумированы. Аналогичная ситуация и при исследованиях в длинноволновой области спектра от 12 до 1000 мкм. В этом случае

спектральный прибор наполняют каким-либо непоглощающим в данной области газом, например азотом, или вакуумируют.

Источники излучения должны обеспечивать достаточную яркость в заданной области спектра. В соответствии с этими требованиями производится выбор материала для их создания. Материалы, используемые в приемниках, должны с минимальными потерями поглощать падающее излучение и эффективно преобразовывать его в другие виды энергии.

## **7.5. Источники оптического излучения**

### **7.5.1. Требования к источникам излучения в эмиссионной спектроскопии**

Спектр излучения, испускаемого веществом, определяется его химическим составом. Необходимо перевести анализируемое вещество из твердого или жидкого состояния в парообразное состояние, т.е. состояние свободных атомов и ионов и вызвать надлежащее возбуждение этих атомов и ионов, чтобы обеспечить их свечение. Совокупность излучающих частиц исследуемого вещества является *источником излучения в эмиссионном анализе*. Поэтому роль источников излучения в эмиссионном спектральном анализе является первостепенной. Для этого используются различные виды электрического разряда. Часто применяют электрические дуги, конденсированные искры. Требования к источникам излучения в эмиссионной спектроскопии очень высокие, так как количественные измерения концентраций анализируемых веществ требуют стабильной работы источников возбуждения спектров. Положение усложняется тем, что абсолютные концентрации анализируемых веществ могут быть относительно малыми, а точность их определения должна быть достаточно высокой. Вследствие этого источники должны обладать хорошим

электрическим режимом работы. Добиться этого непросто, особенно в случае использования дугового и искрового разрядов.

### **7.5.2. Требования к источникам излучения в абсорбционной спектроскопии**

Источники для абсорбционной спектроскопии должны характеризоваться по возможности непрерывным спектром достаточно большой яркости как в видимой, так и ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Кроме того, стабильность работы этих источников также должна быть достаточно высокой. В этой области измерительной техники получили наибольшее применение источники теплового излучения – электрические лампы накаливания и различные штифты накаливания, а также газосветные источники в виде водородных, ртутных ламп и газовых ламп сверхвысокого давления, наполненных инертными газами при больших давлениях.

Излучение среды характеризуют объемной плотностью энергии излучения  $u$  – энергией электромагнитного поля, содержащейся в единице объема излучающей среды. На практике излучение среды чаще определяют величиной мощности (потока излучения)  $P$ , которую измеряют в ваттах. Светящиеся поверхности характеризуют светимостью и яркостью. Светимость  $R$  – это поток излучения, испускаемый единицей поверхности тела в пределах полупространства:

$$R = dP_0/dS, \quad (7.5)$$

где  $dS$  – элемент поверхности, а  $dP_0$  – испускаемый ею поток. Светимость измеряется обычно в Вт/см<sup>2</sup>. Поток излучения  $dP$ , испускаемый площадкой  $dS$  в пределах телесного угла  $d\omega$  в направлении, составляющем с нормалью к площадке угол  $i$ , пропорционален видимым размерам площадки  $dS \cos i d\omega$  и величине телесного угла  $d\omega$

$$dP = B dS \cos i d\omega. \quad (7.6)$$

Коэффициент  $B$  в выражении называют яркостью. Энергетическими единицами яркости являются  $\text{Вт/ср} \cdot \text{см}^2$ . Для оптической спектроскопии представляют интерес спектральные объемная плотность излучения  $u_\nu$ , светимость  $r_\nu$  абсолютно черного тела и яркость  $b_\nu$ , а также спектральная плотность мощности  $P_\nu$ . Часто пользуются понятием интенсивности, которое относят к различным характеристикам излучения. В спектроскопии понятие интенсивности используют как величину, пропорциональную мощности излучения, приходящейся на площадь контура спектральной линии. Обычно интенсивность выражают в относительных единицах.

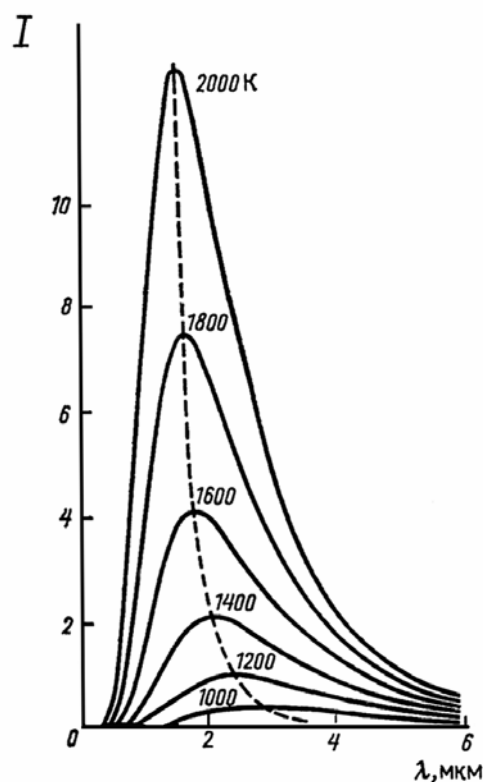


Рис. 7.6. Распределение энергии в спектре абсолютно - черного тела при различных температурах

### 7.5.3. Абсолютно черное тело

Особый интерес при световых измерениях представляют источники в виде раскаленных тел, которые дают непрерывный спектр испускания. В некоторых случаях распределение энергии по спектру у этих источников может быть теоретически рассчитано, так как оно зависит только от абсолютной температуры излучателя и достаточно строго описывается в некоторых пределах длин волн формулой Вина или более общей формулой Планка. Эти формулы получены для случая, когда источник может полностью поглощать падающее на него излучение независимо от длины волны. Такое тело, для которого отношение мощности, поглощенной телом  $P_{\text{погл}}$  к падающей на тело  $P_{\text{пад}}$  равно единице, называется *абсолютно черным*. Излучение абсолютно черного тела определяется только его температурой и не зависит от свойств вещества, из которого он состоит. Распределение энергии в спектре черного тела при разных температурах приведено на рис. 7.7. Поглощательная способность реальных тел меньше единицы. Они излучают меньше черного тела при тех же длинах волн и температурах. Такие источники называют «серыми». Они характеризуются коэффициентом черноты излучения, равном отношению яркостей рассматриваемого тела и черного тела. Испускание некоторых веществ, например вольфрама (рис. 7.7), в коротковолновой области спектра по характеру распределения энергии очень близко к распределению энергии в спектре абсолютно черного тела. Этого можно добиться при некоторой температуре черного тела, которую называют цветовой температурой для данного источника. Отсюда цветовая температура абсолютно черного излучателя - это температура, при которой он бы имел цвет серого излучателя. Это свойство таких тепловых излучателей используется в пирометрии для оптического измерения температур раскаленных тел. Абсолютно черное тело используется как



источник излучения с известными свойствами, например в качестве светового эталона.

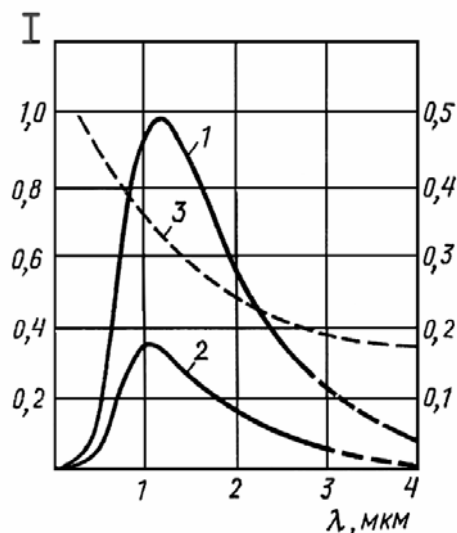


Рис. 7.7. Распределение энергии в спектре вольфрамовой лампы накаливания 2 и черного тела 1 при 245 К. Кривая 3 соответствует поглощательной способности (степени черноты) вольфрама

#### 7.5.4. Источники теплового излучения

Тепловым излучением называют электромагнитное излучение, испускаемое телом, вещество которого находится в состоянии термодинамического равновесия и характеризуется определенной температурой.

Типичными тепловыми источниками являются лампы накаливания, электрические радиационные нагреватели и др. Излучение многих тепловых источников сосредоточено в основном в ИК области спектра. Выбранный источник, как правило, должен работать в достаточно

широкой области спектра. Рассмотрим типичные источники излучения, в которых излучателем служит накалившееся тело.

1. *Источник, близкий к черному телу*, можно создать, создав почти замкнутую полость, нагретую до некоторой температуры  $T$ .

2. *Лампы накаливания* используют в качестве источников с известным распределением энергии по спектру. Телом накала в эталонных лампах является тонкая лента из чистого вольфрама шириной 1–2 мм. Для нагрева лампы до высокой температуры, соответствующей цветовой температуре 2800 – 3000 К, необходим значительный ток, порядка 10–20 А. Коэффициенты черноты излучения чистого вольфрама хорошо известны, поэтому, зная цветовую или яркостную температуру, можно найти спектральную яркость излучения для любой длины волны. Спектральная область работы ламп со стеклянным баллоном ограничена длинами волн от 350 нм до 3 мкм. Границы области определяются прозрачностью баллона. Используя лампу с окном из увиолиевого стекла (плавленый кварц), можно расширить эту область до 200 нм.

3. *Глобар*. Используется в качестве источника инфракрасного излучения в широкой области спектра. Он представляет собой стержень из спрессованного порошкообразного карбокорунда SiC. Карбид кремния имеет высокую температуру плавления и при низких температурах имеет отрицательный температурный коэффициент электрического сопротивления, как у большинства полупроводников, при высоких температурах – положительный как у металлов. Максимум излучательной способности глобара при 1400 К находится в области 2 мкм. Степень черноты излучения глобара велика и составляет величину в пределах 0,8–0,9. Кривая яркости излучения глобара хорошо воспроизводится и может служить стандартом. Разогрев глобара до необходимой рабочей температуры производится электрическим током. Большое количество

тепла, выделяемого при работе глобара, вызывает необходимость его охлаждения проточной водой.

4. *Штифт Нернста*. В качестве тепловых источников излучения используются различного рода накаляющиеся штифты. Среди них особое распространение в инфракрасной спектроскопии получил штифт Нернста, представляющий собой стержень длиной 2,5 см и диаметром 2 мм, спрессованный из порошкообразной массы тугоплавких окислов металлов  $ZrO_2$ ,  $Y_2O_3$ ,  $ThO_2$ . Накаляется штифт Нернста проходящим через него постоянным или переменным током. Непрерывный спектр его простирается от 300 мкм до далекой ИК области. Максимум излучения штифта при рабочей температуре 1700 К находится в области около 1,5 мкм. Благодаря высокой температуре штифт Нернста является хорошим излучателем в ближней ИК области спектра, однако при  $\lambda > 10$  мкм лучшее излучение дает глобар.

#### **7.5.5. Газоразрядные источники излучения**

Источники излучения, использующие свечение плазмы, обладают свойствами, позволяющими широко использовать их в спектроскопии.

Параметры излучающей плазмы могут широко варьироваться путем изменения электрического режима разряда, давления и рода газа. Свойства газового разряда определяются вольт-амперной характеристикой (ВАХ) простейшей двухэлектродной трубки (рис. 7.8). При малых разрядных токах ( $I < 10^{-5}$  А) свечение отсутствует (области А – Д). Свечение в трубке появляется на участке Д – Е, где напряжение быстро падает, а ток увеличивается и возникает нормальный тлеющий разряд (участок Е – Ж).

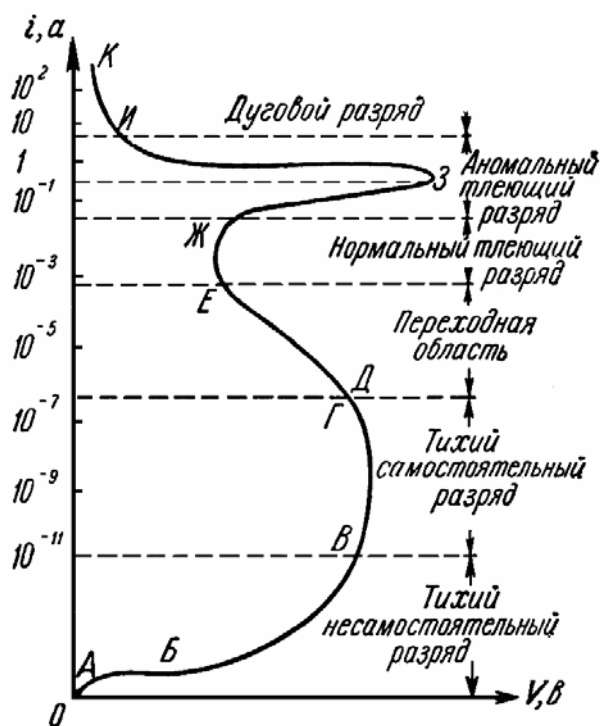


Рис. 7.8. Вольт-амперная характеристика газового разряда

Тлеющему разряду присущи следующие признаки: интенсивное свечение и характерное распределение потенциала вдоль оси газоразрядной трубки. Свечение вдоль трубки неравномерно и можно выделить три области разряда: прикатодную, прианодную и промежуточную. Во многих источниках используется промежуточная область, которая называется положительным столбом из-за небольшого увеличения положительного падения потенциала. Положительный столб представляет собой плазму с высокой проводимостью. При увеличении силы разрядного тока возникает аномальный тлеющий разряд (участок Ж – З), потенциал вдоль трубки растет с увеличением тока. Дальнейшее увеличение тока приводит к постепенному переходу тлеющего разряда в дуговой (участок З – И). Плотность тока у катода – от  $10^{-2}$  до  $10^4$  А/см<sup>2</sup>.

Рассмотрим газообразные источники, используемые для оптической спектроскопии.

*Источник света с тлеющим разрядом.* Конструктивно такой источник представляет собой трубку, в которую впаяны два ненакаливаемых электрода (катод и анод), наполненную каким-либо газом при давлении от 1 до 10 мм рт. ст. Разряд осуществляется при токах в диапазоне от 1 до 100 мА и при напряжении между электродами 0,5–2 кВ. Обычно используется свечение положительного столба разряда, яркость которого зависит от плотности разрядного тока.

Высокочастотный (ВЧ) разряд по оптическим свойствам близок к тлеющему разряду. ВЧ разряд возбуждается на частотах от десятков до 10 тысяч МГц. В ВЧ разряде электроны под действием электрического поля совершают периодические колебания и эффективно возбуждают атомы газа. Минимальная напряженность зажигания ВЧ разряда зависит от давления газа и частоты колебаний. Так, в диапазоне метровых волн давление имеет порядок  $10^{-2}$  мм рт. ст. Иногда используются ВЧ безэлектродные шариковые лампы. Они состоят из кварцевого баллончика диаметром 2–2,5 см, заполненного инертным газом до давления 1,5 мм рт. ст. Помимо газа баллон может содержать небольшое количество легкоиспаряемого металла, например рубидия, цинка, ртути и др. Лампа вставляется между витками катушки ВЧ генератора, работающего на частоте 20 МГц при мощности порядка 40 Вт.

*Источник света с полым катодом.* Этот источник представляет большой интерес, поскольку излучает яркие и узкие спектральные линии. Полый катод имеет вид сферы, цилиндра и прочее с поперечными размерами, сравнимыми с протяженностью катодных частей тлеющего разряда при данном давлении. Условия разряда отличаются от условий обычного тлеющего разряда. Катоды сближены настолько, что их отрицательные свечения перекрываются и возникает «эффект полого катода». Электроны при этом совершают колебательные движения от одного катода к другому, постепенно перемещаясь к аноду. Длина пути

электронов увеличивается. Это приводит к росту возбуждения и ионизации атомов. В спектре источника присутствуют и линии металла, из которого сделан катод. Таким образом, газоразрядные источники с полым катодом позволяют получать спектры различных элементов и находят применение в атомно-абсорбционном спектральном анализе. Ширина спектральных линий в разряде с полым катодом определяется эффектом Доплера и другими видами уширения.

*Лампы низкого давления с дуговым разрядом.* В технике спектроскопии используют спектральные дуговые лампы с парами различных металлов: ртуть, кадмий, цинк, таллий, натрий и др. Они используются для получения спектров сравнения, калибровки измерительной аппаратуры по длинам волн и других задач. Лампы, как правило, рассчитаны на токи 0,5–1 А и напряжение 220 В и включаются в сеть последовательно с дросселем или резистором. Благодаря значительной плотности тока разряда и высокой температуре линии излучения ламп сравнительно широкие.

*Источники излучения низкого давления с непрерывным спектром излучения.* Газовый разряд в водороде и в инертных газах излучает не только отдельные спектральные линии, но и непрерывный спектр в ультрафиолетовой области.

Водородные лампы излучают непрерывный спектр в области 500–170 нм и многолинейчатый – в области 170–90 нм. Водородная лампа может служить источником излучения с известным распределением энергии по спектру, так как изменение в небольших пределах разрядного тока или давления не изменяет распределения энергии. Лампы, содержащие благородные газы (неон, аргон, криптон, ксенон) дают спектры, смещенные в коротковолновую область.

*Ртутные лампы высокого и сверхвысокого давления.* Ртуть широко используется в источниках света, благодаря наличию в ее спектре

небольшого числа ярких спектральных линий, расположенных в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра. Упругость паров ртути достаточно высока, благодаря чему легко создавать лампы с давлением паров от  $10^{-3}$  мм рт. ст. до десятков и сотен атмосфер. Используются трубчатые и шаровые лампы высокого давления и сверхвысокого давления. Эти лампы изготавливают из кварца, так как этот материал выдерживает высокую температуру до 1200 К и давление в десятки атмосфер. Ртутная лампа ПРК (прямая ртутно-кварцевая) представляет собой кварцевую трубку, заполненную аргоном до давления в несколько мм рт.ст.; количество жидкой ртути дозировано таким образом, чтобы при рабочей температуре получить давление паров 1–2 атм. при полном испарении ртути.

Дуговые ртутные шаровые лампы (ДРШ), которые еще называют лампами сверхвысокого давления (СВДШ), имеют толстостенную кварцевую колбу шаровой формы, внутри которой на расстоянии в несколько миллиметров друг от друга расположены два вольфрамовых электрода. Лампы наполнены инертным газом и дозированным количеством ртути, значительно большим, чем лампы ПРК. Лампы этого типа являются практически точечными источниками света.

*Газовые лампы сверхвысокого давления.* Газовые лампы сверхвысокого давления (СВД) (аргоновые, криптоновые, ксеноновые) отличаются от ртутных ламп СВДШ отсутствием ртути. Ввиду высокого начального давления (порядка 20 атм.) напряжение зажигания ламп доходит до десяти киловольт. Излучение ламп СВД имеет сплошной спектр с отдельными спектральными линиями. Наибольшую долю сплошного спектра обеспечивает ксенон.

*Источники возбуждения спектров для эмиссионного спектрального анализа.* Источники в этом случае должны переводить конденсированное вещество в газообразное и обеспечить его свечение. Для этой цели

применяют источники возбуждения спектров (ИВС) с дуговым, искровым или импульсным разрядом в воздухе или в инертном газе. Распространенным источником является дуга переменного тока с высокочастотным поджигом. Температура плазмы дуги зависит от материала электродов и потенциала ионизации примесей в них и находится в пределах 3000–7000 К. В дуге возбуждаются в основном спектральные линии атомов металлов и ионов легковозбудимых элементов. Для повышения точности и расширения возможностей спектрального анализа разработаны специальные генераторы с электронным управлением поджигом разряда.

*Плазмотроны.* Для целей спектрального анализа часто используют плазмотроны. В этих ИВС потоком аргона создается струя плазмы. Исследуемое вещество в виде мелких капель раствора подается в плазму тем же потоком аргона. Наилучшими качествами для спектрального анализа обладает плазмотрон с индуктивно связанной плазмой.

*Лазерные источники излучения.* По спектральной плотности мощности, монохроматичности и направленности лазеры значительно превосходят другие источники излучения. Их действие основано на явлении вынужденного усиления света в средах с инверсией населенности. В простейшем случае лазеры состоят из активной среды (среды, способной к усилению), резонатора (устройства обратной связи) и устройства накачки (устройство для создания инверсии населенности). По типу активной среды лазеры подразделяются на газовые (на атомных, молекулярных или ионных электронных переходах, переходах между колебательно-вращательными уровнями молекул) и лазеры на конденсированных средах (кристаллы, аморфные диэлектрики, жидкости и полупроводники).

Для целей спектроскопии важную роль играет высокая монохроматичность и возможность перестройки линии излучения по длине волны в широких пределах. Используются газовые лазеры, лазеры



на рубине и неодиме, лазеры на F–центрах, на растворах органических красителей, полупроводниковые лазеры и др.

## 7.6. Контур и уширение спектральной линии

Форма и ширина спектральных линий, излучаемых плазмой, чрезвычайно важна в оптической спектроскопии и зависит от многих факторов, к которым относятся как естественная природа излучения, так и различные воздействиями, которым излучающая частица (атом или ион) подвергается в плазме. Основными причинами уширения спектральных линий являются: естественная ширина, доплеровское уширение, уширение при взаимодействии атомов с окружающими частицами. Рассмотрим эти причины подробнее.

*Естественная ширина спектральных линий.* Атомы и молекулы, переходя из возбужденного состояние в основное, могут излучать электромагнитные волны, частота которых  $\nu = \Delta E / h$ , где  $\Delta E$  – разность энергий возбужденного и основного состояний,  $h$  – постоянная Планка. Таким образом, в идеальном случае бесконечно тонких уровней энергии возбужденные частицы должны излучать строго монохроматические волны. Однако эксперименты показывают, частицы излучают целый спектр частот, образующих спектральную линию. Даже в случае отсутствия какого-либо воздействия на частицу спектральная линия имеет конечную, так называемую естественную ширину, неустранимую никакими способами. Это уширение связано с тем, что сами уровни не являются бесконечно «узкими». Их ширина обусловлена соотношением неопределенностей Гейзенберга и зависит от времени жизни частицы. Неопределенность или «размытие» уровня, а соответственно и ширина линии обратно пропорциональны времени жизни частицы в начальном состоянии. И только в случае, когда это время бесконечно велико,

естественная ширина линии близка к нулю. Однако в действительности время жизни свободной частицы на уровне всегда конечно. Это и приводит к определенной естественной ширине линии. Однако в видимой области спектра естественная ширина линии очень мала и составляет величину порядка  $10^{-5}$  нм.

*Доплеровское уширение.* Атомы и ионы в плазме источников света находятся в постоянном движении. Частота излучения атомов, воспринимаемая приемником, зависит от величины и направления скорости их движения относительно приемника (эффект Доплера). Хаотичность теплового движения, при котором частицы имеют всевозможные по направлению и величине скорости, приводит к тому, что вместо одной частоты, характерной для неподвижных частиц, приемник воспринимает широкий спектр частот. При хаотичном движении частиц в плазме распределение их по скоростям выражается функцией Максвелла. Для проекций скоростей на направление луча зрения распределение Максвелла имеет гауссову форму. Доплеровская ширина линии пропорциональна вероятной скорости частиц в газе, а также частоте перехода. Наиболее вероятная скорость частиц, соответствующая максимуму распределения, определяется выражением

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}, \quad (7.7)$$

где  $R$  – газовая постоянная,  $\mu$  – атомный вес частиц. Доплеровскую ширину линии можно рассчитать с помощью следующего выражения, где учтены значения констант:

$$\Delta\lambda_D = 7,16 \cdot 10^{-7} \lambda \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (7.8)$$

Доплеровская ширина линии зависит от температуры газа и атомного веса излучающих частиц, поскольку этими параметрами определяется их скорость, а также от частоты излучения. Роль эффекта

Допплера особенно важна в оптическом диапазоне длин волн. При высоких температурах доплеровская ширина может быть велика даже для легких элементов. Так, доплеровская ширина водородной линии ( $\lambda = 486,1$  нм) при 5000 К составляет 0,025 нм. Самым тяжелым элементом, используемым в источниках света, является ртуть. В видимой области спектра при температуре 5000 К линия ртути имеет ширину порядка  $10^{-3}$  нм. Таким образом, доплеровская ширина линии в обычных условиях примерно на два порядка превышает естественную ширину. Доплеровское и естественное уширение линии одновременно влияют на контур спектральной линии.

Сравнение доплеровского (1) и естественного (2) контуров спектральных линий показано на рис.7. 9. Контур нормированы по площади и имеют одинаковую ширину. Из рисунка видно, что гауссова и дисперсионная функции различны по форме.

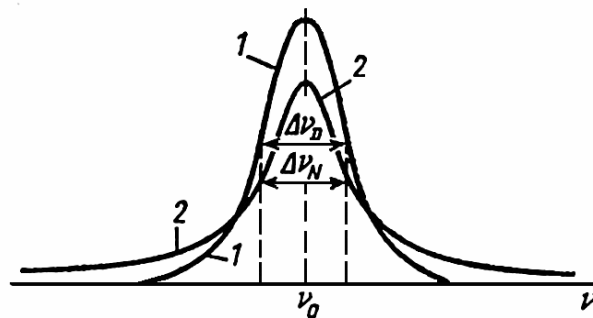


Рис. 7.9. Контур линии: доплеровский (1) и естественный (2)

*Уширение при взаимодействии атомов с окружающими частицами.*  
 Если излучающее вещество находится в газообразном состоянии, то отдельные частицы в процессе теплового хаотического движения сталкиваются между собой и со стенками баллона. Так как при столкновениях энергетическое состояние частицы может изменяться, это эквивалентно сокращению времени жизни частицы на данном уровне, что

в соответствии с соотношением неопределенностей приводит к уширению спектральной линии за счет столкновений. При высоком давлении газа уширение линии происходит в основном за счет соударений частиц друг с другом, при малых давлениях сказывается столкновение частиц со стенками баллона. Контур линии, получающийся при соударениях, называется лоренцовским. Лоренцовская ширина линии  $\Delta\nu_L$  обратно пропорциональна среднему времени жизни частиц между соударениями  $\tau_0$ . Если величину  $\tau_0$  определить с помощью кинетической теории газов, то ширина линии может быть оценена с помощью выражения

$$\Delta\lambda_L \approx 5 \cdot 10^9 \frac{p\sigma^2}{\sqrt{\mu T}} \lambda^2, \quad (7.9)$$

где  $\sigma$  – эффективное сечение соударения в  $\text{см}^2$ ,  $p$  – давление в барах,  $\lambda$  – длина волны в см,  $\mu$  – атомный вес излучающей частицы. Более точное рассмотрение показывает, что линия при столкновениях уширяется несимметрично, происходит ее смещение, пропорциональное давлению.

*Влияние электрических и магнитных полей.* Воздействие постоянных электрических и магнитных полей на уровни энергии атомов и молекул может приводить к сдвигу этих уровней и к их расщеплению на несколько подуровней (эффекты Штарка и Зеемана). Если величина расщепления меньше ширины каждого подуровня, то рядом лежащие подуровни частично перекрываются. Таким образом, суммарная ширина спектральной линии будет больше исходной линии в отсутствии поля.

## 7.7. Приемники оптического излучения

Приемники излучения должны обладать определенной световой характеристикой в виде связи между некоторой величиной, характеризующей интенсивность измеряемого излучения, и величиной реакции, вызываемой в приемнике данным излучением. Таким образом, работа любого приемника излучения основана на взаимодействии

излучения с чувствительным элементом приемника. В зависимости от характера этого взаимодействия приемники разделяют на два класса: тепловые и фотонные.

В тепловых приемниках поглощенная энергия излучения увеличивает тепловую энергию приемника, в результате чего изменяются его физические свойства. Тепловая энергия затем преобразуется в электрическую с помощью какого-либо физического явления, например термоэлектрического, пироэффекта и др. Фотонные приемники (фотоприемники) реагируют на фотоны, поглощенные в приемном элементе. В основе действия большинства фотоприемников лежит явление фотоэффекта. В зависимости от вида фотоэффекта различают фотоприемники фотоэмиссионные (с внешним фотоэффектом) и фотоэлектрические полупроводниковые (с внутренним фотоэффектом). Большинство фотоэлектрических приемников использует две разновидности внутреннего фотоэффекта: фоторезистивный и фотогальванический.

При заданной энергии, поступающей на приемник, отклик теплового приемника (нагрев) одинаков в любой спектральной области. Отклик фотоэлектрического приемника (число возникших электронов) растет с длиной волны в соответствии с уменьшением энергии фотона  $h\nu$ . На практике спектральная область работы приемника определяется поглощательной способностью его элемента.

### **7.7.1. Основные характеристики приемников излучения**

*Чувствительность.* Важнейшим параметром приемников является *интегральная чувствительность*  $S$ , которая определяется как отношение величины электрического сигнала, выраженной в единицах напряжения или тока на выходе приемника, к величине светового потока в люменах на

его входе. Однако в спектроскопии используется больше спектральная чувствительность  $S_v$ , относящаяся к монохроматическому излучению.

*Шумовые и пороговые параметры.* Помимо полезного сигнала на выходе фотоприемника имеет место хаотический сигнал со случайной амплитудой и спектром – это шум фотоприемника. Шум не позволяет регистрировать сколь угодно малое значение входного излучения, так как оно становится неразличимым на фоне шума. В связи с этим вводят *пороговую чувствительность*, определяемую минимальным сигналом на его выходе, который можно заметить на фоне его собственных шумов. Шумы в приемниках излучения имеют разную природу:

1) фотонный шум – шум излучения, обусловленный флуктуацией числа фотонов, поступающих на приемник в единицу времени;

2) дробовой шум - флуктуации темнового тока, возникающие при отсутствии освещения;

3) тепловой шум, соответствующий обычному некогерентному излучению, которое испускается любым телом при отличной от нуля температуры;

4) низкочастотный шум, мощность которого пропорциональна частоте, имеет место практически во всех приемниках излучения. В зависимости от типа приемника эти шумы носят разное название.

*Квантовая эффективность.* Наблюдаемость сигнала определяется отношением его мощности  $P$  к мощности шумов  $P_{ш}$ , поступающих вместе с ним. В реальных устройствах шум на выходе может оказаться меньше, чем на входе. Для характеристики приемного устройства в целом вводят квантовую эффективность равную

$$\eta = (P/P_{ш})_{\text{вых}} / (P/P_{ш})_{\text{вх}}. \quad (7.10)$$

Величина  $\eta$  удобна для сравнения любых приемников излучения в реальных условиях.

*Инерционность приемников.* Отклик фотоприемника на поданный сигнал не может быть мгновенным. Быстрота его реакции обусловлена физическими процессами, протекающими в нем при освещении. Быстродействие фотоприемников играет важную роль при переменном сигнале. Замедленность реакции фотоприемника приводит в этом случае к падению чувствительности при превышении критической частоты модуляции сигнала. Инерционность фотоэлектронных приемников намного меньше, чем тепловых.

### **7.7.2. Разновидности приемников излучения**

#### *Тепловые приемники излучения*

К тепловым приемникам излучения относятся вакуумные термоэлементы, термостолбики, болометры и другие, где излучение вызывает изменение температуры приемника, регистрируемой тем или иным способом. Для адекватных измерений необходимо, чтобы установилось равенство между энергией падающего потока, поглощаемого приемником, и энергией, отдаваемой приемником в окружающую среду (тепловые потери). Чувствительность таких приемников тем выше, чем меньше тепловые потери. Однако инерционность приемников определяется временем установления теплового равновесия, которое тем меньше, чем больше тепловые потери. Поэтому для конкретных применений выбирают компромиссное решение.

Наибольшее распространение получили термоэлементы и термостолбики.

Действие *термоэлементов* основано на возникновении термо-ЭДС при нагревании спая двух металлов (термопары).

Термоэлемент состоит из одной или нескольких термопар, включенных последовательно и образующих термостолбик. Схема включения *a* и устройство *б* приведены на рис. 7.10. Часто используют торцовую систему, в которой приемный поглощающий элемент опирается на два стержня из материалов, образующих термопару. В непосредственной близости от измерительной термопары помещают такую же компенсационную, включенную навстречу.

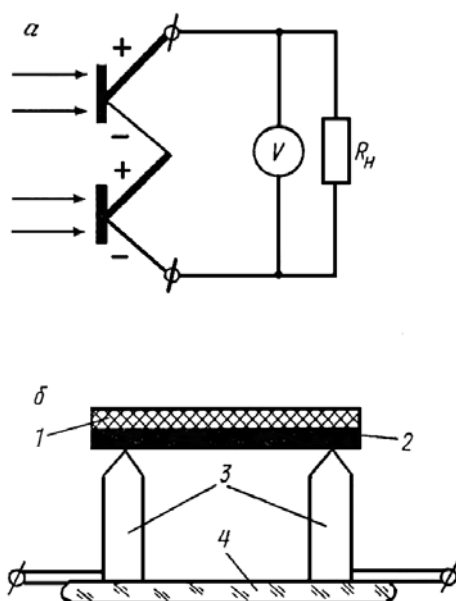


Рис. 7.10. Схема включения (*a*) и устройство (*б*) термоэлемента: 1 – поглощающий слой; 2 – металлическая токопроводящая площадка; 3 – стержни из материалов, составляющих термопару; 4 – основание

Термоэлемент находится в баллоне с высоким вакуумом. Потери тепла происходят только за счет излучения и теплопроводности стержней, поэтому постоянная времени термоэлемента обычно велика и составляет 10-50 мс.



В качестве материалов для термопар используются, например, пары висмут – сурьма, висмут – теллур или более сложные сплавы, обеспечивающие максимальное значение термо-ЭДС.

Термоэлементы не обладают избирательной спектральной чувствительностью. Однако используются они только в красной и инфракрасной области спектра, так как их интегральная чувствительность мала по сравнению с известными фотоэлектрическими приемниками.

*Болометры.* Действие болометров основано на изменении электрического сопротивления материала при нагреве, происходящем вследствие поглощения оптического излучения. Для регистрации сигнала используют мостовую схему, в одно из плеч которой включен рабочий элемент болометра. Во втором плече находится элемент аналогичный рабочему (компенсационный), но защищенный от падающего излучения. Элементы размещены в непосредственной близости один от другого на одной подложке. Рабочий элемент болометра должен наилучшим образом поглощать падающее на него излучение и максимально изменять электрическое сопротивление при нагреве.

Болометры бывают трех типов: металлические, полупроводниковые и сверхпроводящие. Чувствительным элементом металлического болометра в простейшем случае служит полоска металлического токопроводящего слоя толщиной 0,07-0,15 мкм, сопротивление которой составляет несколько Ом. Изменение температуры такой полоски при поглощении падающего на нее света регистрируется по изменению ее сопротивления. Для болометров используются металлы или сплавы металлов, которые обладают большим температурным коэффициентом. В обычных болометрах температурный коэффициент составляет, примерно, 0,3–0,5 % на 1°C.

Полупроводниковые болометры и болометры на основе комбинации окислов некоторых металлов обладают значительно большей относительной чувствительностью, так как их отрицательный температурный коэффициент сопротивления в десятки раз выше. Такие болометры носят название *термисторов*. Еще большей чувствительностью обладают некоторые полупроводники при низких температурах (- 257 °С). В области перехода в сверхпроводящее состояние температурный коэффициент сопротивления материалов может достигать сотен и тысяч процентов на градус. Область перехода материалов в сверхпроводящее состояние находится в большинстве случаев при температурах, близких к температуре жидкого гелия.

Спектральная чувствительность болометров равномерна в широкой области спектра. Так, болометр с окном из KBr, защищенным от влаги тонким слоем (1 мкм) фтористого магния, работает в области спектра от 0,2 до 38 мкм. Болометр с кварцевым окном предназначен для длинноволновой области спектра от 50 до 1000 мкм. Однако в области длин волн более 200 мкм его чувствительность уменьшается из-за ухудшения поглощательных свойств.

Инерционные свойства полупроводниковых болометров определяются массой чувствительного элемента и массой подложки. Так как масса подложки велика, тепловой баланс устанавливается в течение длительного времени. По этой причине полупроводниковые болометры используются только для измерений модулированного излучения, когда подложка не прогревается на большую глубину. Однако, при этом уменьшается чувствительность.

## Оптико-акустические приемники

*Оптико-акустические* приемники (ОАП), называемые также *пневматическими*, или приемниками Голея, сложнее других тепловых приемников по конструкции, но обладают рядом преимуществ – высокой чувствительностью и большой приемной площадкой.

В оптико-акустическом приемнике (рис. 7.11) поглощающим элементом является пленка, нагреваемая излучением.

Пленка находится в газовой камере, поэтому от нее нагревается газ. При модуляции излучения с небольшой частотой давление в газовой камере изменяется с той же частотой. Газовая камера с одной стороны закрыта окошком, прозрачным для ИК излучения, с другой – гибкой мембраной с зеркальной внешней поверхностью. При изменениях давления в камере мембрана изгибается. Этот небольшой изгиб обнаруживается с помощью оптической системы.

Постоянная времени ОАП зависит от теплоемкости поглощающей пленки и теплопроводности газа. Наименьшей постоянной времени порядка 1 мс обладает ОАП, наполненный газом с высокой теплопроводностью – гелием. Однако малая постоянная времени сопровождается малой чувствительностью приемника.

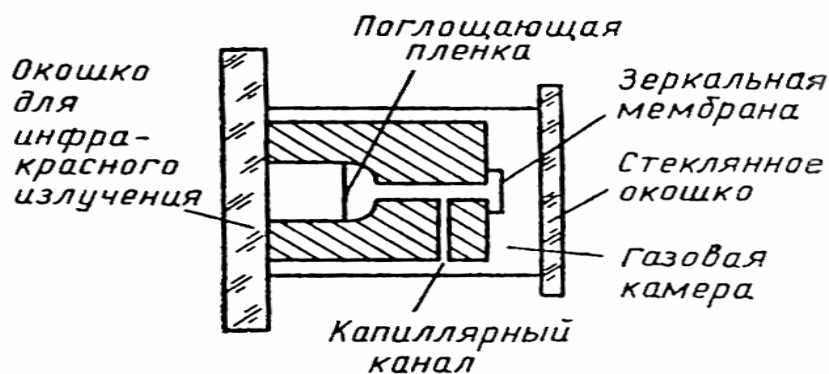


Рис. 7.11.

Спектральная область чувствительности ОАП определяется поглотительными свойствами пленки и прозрачностью окна.

*Пироэлектрические приемники*. Пироэлектрические приемники являются тепловыми приемниками света с широкой спектральной областью чувствительности и малой постоянной времени. Действие пироэлектрических приемников основано на явлении пироэлектричества, наблюдающемся в некоторых кристаллах, не имеющих центра симметрии: титанате бария  $BaTiO_3$ , ниобате лития  $LiNbO_3$ , сегнетовой соли и некоторых других. Эти кристаллы обладают постоянным дипольным моментом в направлении полярной оси, поверхность кристалла, срезанная перпендикулярно этой оси, всегда электрически заряжена. Однако этот заряд внешне не проявляется, так как за счет микротоков, протекающих по кристаллу, а также ионов, оседающих из воздуха, поверхностные заряды нейтрализуются. Равновесие нарушится, если изменить ориентацию элементарных диполей кристалла путем нагревания. Для его восстановления требуется некоторое время, в пределах которого поверхностный заряд может быть обнаружен.

Для пироприемников выбирают материалы с наибольшим пироэлектрическим эффектом, т.е. с наибольшим изменением дипольного момента при нагреве, с хорошей поглотительной способностью, высоким электрическим сопротивлением и малой теплопроводностью. Наиболее употребительны танталат лития  $LiTaO_3$  и триглицинсульфат (ТГС)  $(NH_2CH_2OON)_3 H_2SO_4$ , хорошо поглощающие в широкой области спектра.

Пироприемники регистрируют только импульсные сигналы, так как их отклик пропорционален скорости прироста температуры. Во всех других тепловых приемниках отклик пропорционален приросту температуры. Они способны измерять очень короткие световые импульсы

с длительностью, много меньшей их тепловой постоянной времени  $t_{\text{тепл}}$ . Если измерению подлежит непрерывный световой поток, его модулируют так, чтобы длительность каждого импульса была меньше  $t_{\text{тепл}}$ , а интервалы между ними больше (3-5)  $t_{\text{тепл}}$ .

Типичные схемы устройства пироприемников и принцип их работы показаны на рис. 7.12. Основой пироприемника является пластина из пироэлектрика, перпендикулярно полярной оси которой расположены металлические электроды, к которым подсоединены внешние выводы. Падающее излучение поглощается в специальном слое черни или в самом пироэлектрике за счет собственного поглощения.

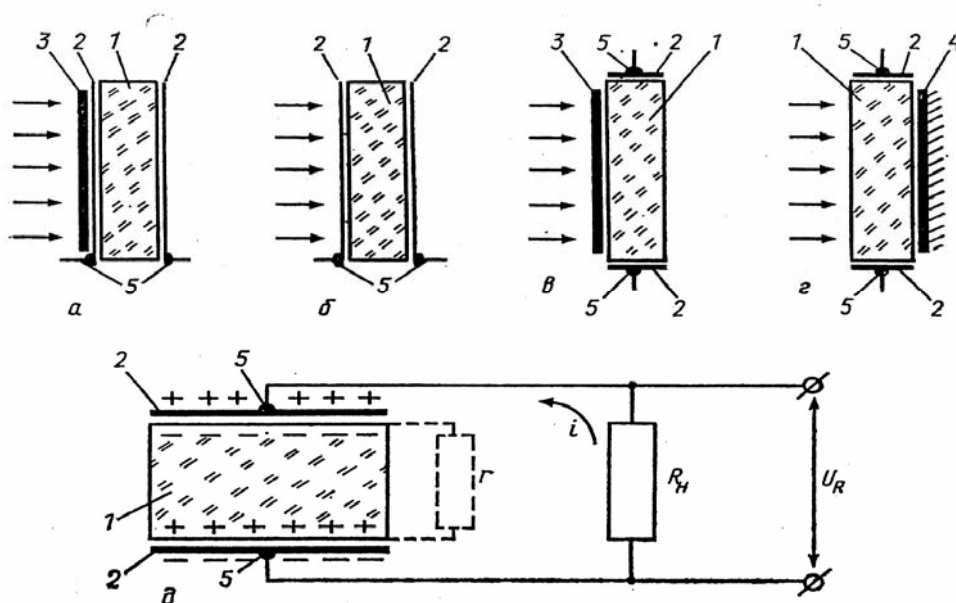


Рис. 7.12. Схемы и устройства пироприемников с плоскими (а, б) и торцевыми (в, г) электродами и электрическая схема их включения

В зависимости от величины постоянной времени электрической цепи  $\tau_{\text{эл}}=R_{\text{н}}C$  возможна работа приемника в двух режимах: измерения энергии и измерения мощности.

Спектральный диапазон пироприемников простирается от  $\gamma$  и рентгеновской области до сантиметровых волн и определяется поглотительной способностью пироэлектрика и черни.

На основе пироэлектрика возможно создание одномерных и двумерных многоэлементных приемников – линеек и матриц, используемых для систем приема изображений.

*Фотоэмиссионные приемники.* К фотоэмиссионным приемникам относятся фотоэлементы, фотоумножители и электронно-оптические преобразователи. Фотоэмиссионные приемники отличаются более высокой чувствительностью, чем тепловые.

Принцип работы электровакуумных фотоэлектронных приборов основан на использовании фотоэлектронной эмиссии.

*Фотоэлемент* – прибор, в котором используется явление внешнего фотоэффекта. Различают электровакуумные и газонаполненные фотоэлементы. Наиболее часто используют фотоэлементы, которые имеют два электрода: фотокатод, служащий источником электронов, и анод, собирающий электроны. В видимой, инфракрасной и ближней ультрафиолетовой областях спектра чаще применяют фотокатоды на основе полупроводниковых материалов. Основными параметрами фотоэлементов являются чувствительность, квантовый выход или квантовая эффективность, шумы, минимально регистрируемая мощность излучения (пороговый поток), обнаружительная способность, темновой ток, постоянная времени и др. К основным характеристикам фотоэлементов относятся: спектральные, вольт-амперные (рис. 7.13), энергетические (рис. 7.14), частотные и температурные.

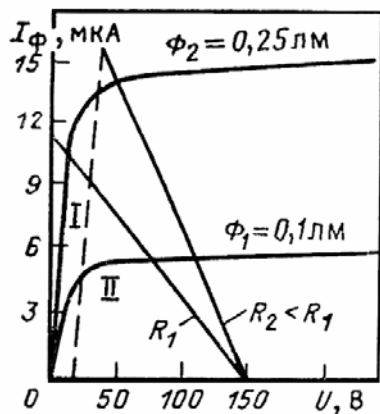


Рис. 7.13. Вольт-амперная характеристика фотоэлемента

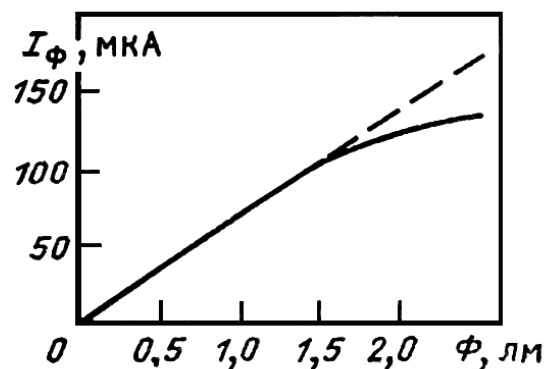


Рис. 7.14. Энергетическая (световая) характеристика фотоэлемента.

Частотные характеристики определяются инерционностью фотоэлементов. Обычно электровакуумные фотоэлементы имеют частотный диапазон до  $10^6$  Гц.

Спектральными характеристиками фотоэлементов называют зависимости монохроматической чувствительности  $S_\lambda$  от длины волны излучения  $\lambda$ , воздействующего на фотокатод фотоэлемента. Эти характеристики зависят в основном от электрофизических параметров материалов, из которых изготовлены фотокатоды. Спектральные характеристики сурьмяно-цезиевых и кислородно-цезиевых катодов показаны на рис. 7.15.

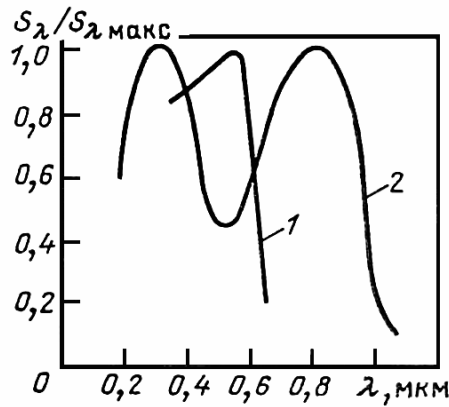


Рис. 7.15. Спектральная характеристика сурьмяно-цезиевых (1) и кислородно-цезиевых (2) катодов

Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) представляет собой электровакуумный фотоэлемент, объединенный с электронной усилительной системой в едином корпусе (баллоне). Действие усилительной системы основано на явлении вторичной электронной эмиссии. Устройство фотоэлектронного умножителя показано на рис. 7.16, а, б.

Эмитируемые фотокатодом (ФК) электроны, ускоряемые и фокусируемые электродами, попадают на первый диод  $D_1$ , с коэффициентом вторичной эмиссии  $\sigma$ .



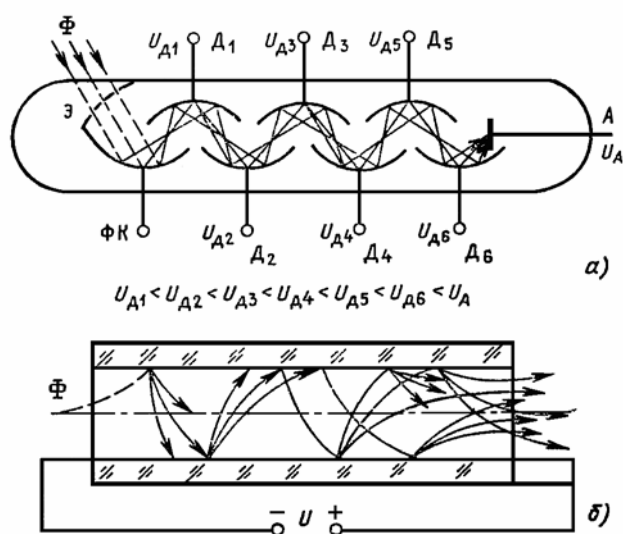


Рис. 7.16. Устройство фотоэлектронного умножителя

Часть электронов теряется в фокусирующей и ускоряющей системе (на сетке Э, рис. 7.16, а), что обычно учитывается с помощью коэффициента  $\gamma_k$ .

С поверхности первого динода выйдет в  $\sigma$  раз большее число электронов, чем на него упадет. Появившиеся после бомбардировки первого динода вторичные электроны ускоряются полем второго динода  $D_2$  и выбивают из него вторичные электроны, т.е. со второго динода уйдет в  $\sigma^2$  раз большее число электронов и т. д. К аноду придет поток электронов в  $\sigma^m$  раз больший, чем было испущено катодом ( $m$  — число динодов).

Ток, протекающий в цепи анода, будет равен  $I_A = \gamma_k M I_k$ , где  $I_k$  — ток эмиссии с фотокатода. Число динодов в ФЭУ может быть более 10. При коэффициенте вторичной эмиссии, равном 4, это соответствует увеличению фототока в  $10^6$  раз.

Постоянная времени ФЭУ определяется временем развития электронной лавины и составляет обычно  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  сек.

Спектральная область работы ФЭУ определяется областью чувствительностью фотокатода и прозрачностью выходного окна. Недостатком ФЭУ является некоторая нестабильность и повышенный темновой ток. При охлаждении жидким азотом удается добиться пороговой чувствительности, соответствующей регистрации одного фотона в секунду.

*Электронно-оптические преобразователи (ЭОП)* предназначены для преобразования оптического изображения из одной области спектра в другую или для усиления яркости изображения. В простейшем случае ЭОП имеет вакуумированный корпус с окном, на которое с внутренней стороны нанесен фотокатод, преобразующий оптическое изображение объекта в электронное. Фотоэлектроны дают изображение объекта на люминесцирующем экране, который вновь преобразует электронное изображение в оптическое. Яркость изображения в одном каскаде ЭОПа повышается в несколько десятков раз, в многокаскадных ЭОПах усиление достигает  $10^4$ .

*Фотоэлектрические полупроводниковые приемники.* В фотоэлектрических полупроводниковых приемниках используют два вида внутреннего фотоэффекта: фотопроводимости и фотогальванический.

*Фоторезисторы.* В фоторезисторах используется эффект фотопроводимости. Он состоит в создании фотоносителей при облучении полупроводника. В результате изменения концентрации носителей в полупроводнике увеличивается его проводимость.

Темновая проводимость полупроводника при нулевом световом потоке и постоянной температуре определяется равновесной концентрацией электронов и дырок. При поглощении излучения в полупроводнике генерируются избыточные носители, концентрация которых зависит от потока излучения и параметров полупроводника.

Большое распространение получили фоторезисторы из сульфида и селенида кадмия, а также сульфида и селенида свинца. Легируя полупроводники различными примесями, можно создать приемники, чувствительные не только в оптическом диапазоне, но и в ИК-диапазоне. Так, фоторезистор на основе CdS имеет длинноволновую границу чувствительности при 0,5 мкм, а германий с примесью меди, уровень которой находится на расстоянии 0,04 эВ над валентной зоной имеет длинноволновую границу чувствительности около 30 мкм. Однако примесные фоторезисторы чувствительны к тепловому излучению окружающей среды, поэтому такие фотоприемники должны работать при температуре жидкого гелия. Постоянная времени фоторезисторов определяется скоростями переходных процессов генерации и рекомбинации носителей тока и другими факторами. Особенностью фоторезисторов является нелинейность световой характеристики.

*Фотодиоды.* В фотодиодах, фототранзисторах и других фотоприемниках с p-n-переходами и переходами металл-полупроводник используется фотогальванический эффект.

Фотогальванический эффект возникает в структурах с внутренним потенциальным барьером в p-n-переходе, переходе металл-полупроводник и др. Принцип работы фотодиодов показан на рис. 7.17. Неосвещенный p-n-переход находится в равновесном состоянии и характеризуется соответствующим потенциальным барьером. При облучении p-n-перехода

потоком фотонов, с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника, в p-n- переходе и прилегающих к нему областях генерируются избыточные носители. Внутреннее электрическое поле перехода разделяет возникшие под действием излучения фотоносители. Пространственно разделенные фотоносители разных знаков – дырки и электроны – частично компенсируют заряд ионов примесей, изменяя высоту потенциального барьера на величину фото-ЭДС, называемую напряжением холостого хода  $U_{xx}$  (рис.7.17, б).

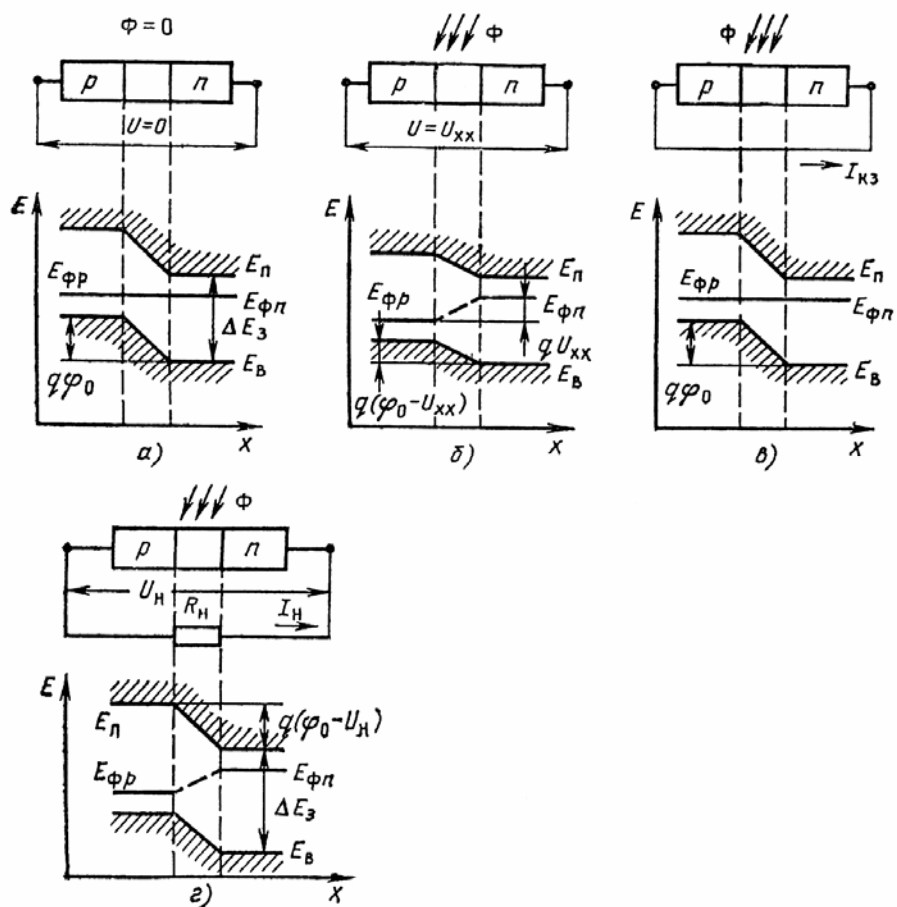


Рис. 7.17. Энергетические диаграммы освещенного и неосвещенного p-n-перехода.

Отклик фотоприемника с р-п-переходом можно регистрировать двумя способами: в фотovoltaическом режиме, когда фотоприемник подсоединен непосредственно к измерительному прибору и измеряется его собственная фото - ЭДС или фототок, и фотодиодном режиме, когда во внешней цепи содержится источник тока.

В фотодиодном режиме к р-п-переходу приложено запирающее напряжение. При нулевом световом потоке через фотодиод протекает слабый темновой ток. При освещении величина потенциального барьера снижается и ток возрастает. Вольт-амперная характеристика фотодиода приведена на рис. 7.18.

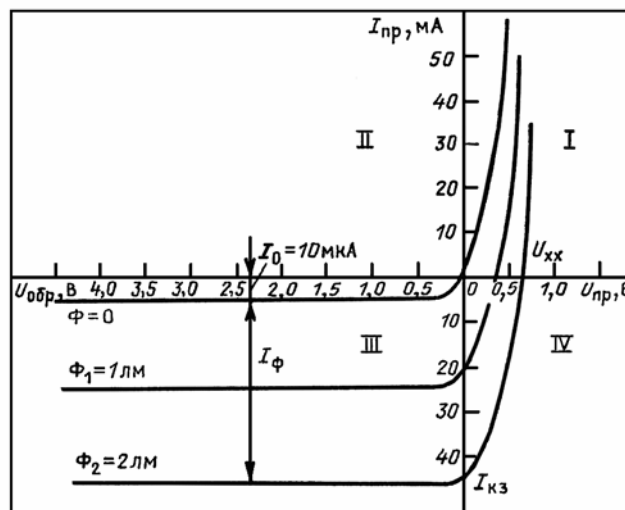


Рис. 7.18. Вольт-амперная характеристика фотодиода

Величина тока в широких пределах пропорциональна интенсивности падающего излучения и практически не зависит от напряжения смещения, что выгодно отличает фотодиоды от фоторезисторов. По своим характеристикам фотодиоды подобны вакуумным фотоэлементам с внешним фотоэффектом.

Спектральные характеристики фотодиодов подобны характеристикам фоторезисторов из аналогичных материалов. Наиболее распространены фотодиоды на основе германия и кремния.

Быстродействие фотодиодов определяется процессами разделения носителей, возникающих при поглощении излучения и емкостью р-п перехода. Быстродействие фотодиодов может быть повышено путем использования более сложных полупроводниковых структур.

*Фотодиод с р-і-п структурой*, в которой р- и п-области разделены нелегированной і-ой областью, обладающей значительно большим сопротивлением. При достаточно больших обратных напряжениях сильное и однородное электрическое поле занимает всю і-ую область и дырки и электроны, появившиеся в результате облучения, быстро разделяются электрическим полем. Повышение быстродействия обусловлено тем, что процесс диффузии заменяется более быстрым дрейфом. Быстродействие в этом случае составляет величину порядка  $10^9$  и выше.

*Фотодиоды Шоттки* со структурой металл-полупроводник позволяют повысить быстродействие до  $10^{10}$  и выше. Важной особенностью фотодиодов Шоттки является возможность поглощения кванта с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны. Они сочетают высокую чувствительность и высокое быстродействие.

Фотодиоды с гетероструктурой также позволяют работать в любой части оптического диапазона и, кроме того, их КПД может достигать величин, близких к 100 %.

Для регистрации малых световых потоков перспективно использование *лавинных фотодиодов*, использующих лавинный пробой.

Для повышения чувствительности могут быть использованы *фотоприемники с внутренним усилением*, в которых кроме преобразования излучения в электрический ток имеет место еще и увеличение (усиление) фототока. К таким фотоприемникам относятся фототранзисторы и фототиристоры.

*Линейные и матричные приемники излучения.* Рассмотренные выше фотоприемники можно отнести к классу интегральных систем регистрации, при которой в электрический сигнал преобразуется весь поток излучения (интегральный световой поток), без определения распределения энергии излучения по длинам волн.

Другой тип систем регистрации - системы с построением изображения, в которых в качестве приемников излучения используются линейные или матричные многоэлементные фотоприемники. В этом случае кроме собственно измерения количества энергии оптического излучения производится и определение распределения энергии излучения по длинам волн.

Линейный фотоприемник состоит из большого количества (до нескольких тысяч) фоточувствительных элементов, расположенных в линию. Фоточувствительные элементы линейного фотоприемника называют «пикселями». Они являются минимальным элементом изображения. Линейный фотоприемник устанавливается в фокальной плоскости спектрального прибора (в этом случае он называется спектрографом) таким образом, чтобы пространственно разложенное в спектр выходное излучение располагалось вдоль линейки фоточувствительных элементов (пикселей). Каждый пиксель регистрирует излучения с шириной спектральной полосы, определяемой линейной шириной пикселя и дисперсией прибора. Регистрация сигналов со всех

фоточувствительных элементов линейного фотоприемника производится одновременно. Если построить график зависимости интенсивности сигнала (ось ординат) с фоточувствительного элемента от порядкового номера этого элемента (ось абсцисс), то полученный график будет являться графиком зависимости энергии выходного излучения от длины волны, т.е. спектром.

Например, если обратная линейная дисперсия равна 2,37 нм/мм, а ширина одного пикселя равна 14 мкм, спектральная полоса, регистрируемая одним пикселем, будет равна 0,033 нм. При общем количестве пикселей этого приемника равном 2048 спектральный интервал длин волн, регистрируемый всем приемником, будет составлять 68 нм. Для того чтобы получить весь спектр, необходимо регистрировать его по частям, поворачивая дифракционную решетку в спектрографе с определенным шагом, производя на каждом шаге регистрацию спектра.

Наряду с линейными фотоприемниками в системах регистрации с построением изображения используются матричные фотоприемники, в которых фоточувствительные элементы расположены в виде поля (матрицы) из большого количества линеек, называемых строками.

Наиболее широко системы регистрации с матричными фотоприемниками применяются в многоканальной спектроскопии.

*Полупроводниковые приемники изображения.* Линейные и матричные фотоприемники могут быть созданы на основе твердотельных фоточувствительных элементов, использующих перенос локализованного заряда. На этом принципе основаны *приборы с зарядовой связью (ПЗС)*. Возможность построения приемников изображения на основе ПЗС обусловлена накоплением фотогенерированных неосновных носителей заряда в потенциальных ямах, сформированных под электродами ПЗС.

В ячейках ПЗС обычно используют МОП (металл-оксид-полупроводник) конденсаторы, состоящие в простейшем случае из



легированного, например с акцепторной примесью, полупроводникового кристалла с окисленной поверхностью, на которую нанесен металлический электрод. Возникающие под действием облучения носители заряда собираются в образовавшейся вблизи границы раздела полупроводник – окисел потенциальной яме. Скопившийся заряд пропорционален интенсивности падающего излучения и времени накопления. В ПЗС МОП конденсаторы расположены на общей подложке близко друг к другу, таким образом, что их потенциальные ямы соприкасаются и заряд может перетекать из одной ямы в другую, более глубокую, т.е. туда, где выше значение потенциала.

Рассмотренные системы приема изображения работают при малых электрических напряжениях, не требуют вакуумирования, обладают малыми размерами и высокой надежностью. Квантовый выход фотоэффекта очень высок и может достигать 80%. Кроме того, в одном полупроводниковом кристалле могут содержаться и приемник и система сбора, хранения и передачи информации.

## **7.8. Система регистрации спектров**

Система регистрации спектров включает в себя фотоэлектрический приемник излучения, преобразующий падающее на него излучение в электрические сигналы, и аппаратные и программные средства для обработки и визуализации этих сигналов.

Процесс регистрации производится следующим образом. Электрические сигналы с фотоприемников поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который обычно встраивается в спектральный прибор. Плата АЦП принимает и обрабатывает сигналы. Управление АЦП производится от компьютера с помощью интерфейса. Компьютер может управлять и работой спектрального прибора. Таким образом на базе АЦП может быть построен спектрально-измерительный

комплекс, который позволяет производить сканирование по спектру в заданном спектральном интервале с заданным шагом с одновременной регистрацией сигналов от фотоприемника. Результаты измерений выводятся на монитор в виде графика зависимости величины сигнала от длины волны.

При выборе системы регистрации необходимо учитывать спектральный диапазон работы детектора и скорость регистрации спектров.

Спектральный диапазон регистрируемого интервала длин волн в большинстве случаев зависит от области спектральной чувствительности приемника излучения, так как обычно спектральные приборы могут обеспечить достаточно широкий диапазон длин волн.

Линейные и матричные детекторы на базе кремниевых структур имеют область спектральной чувствительности от 200 до 1100 нм (ультрафиолетовая, видимая и ближняя инфракрасная область спектра). Линейные детекторы для ближней инфракрасной области спектра - область спектральной чувствительности от 900 до ~2500 нм – достаточно дорогие. Таким образом, одним из ограничений использования линейных детекторов является их сравнительно узкий диапазон спектральной чувствительности.

Интегральные фотоприемники имеют гораздо более широкую область спектральной чувствительности. В зависимости от типа фотоприемника, они могут регистрировать излучение в диапазоне длин волн от 190 нм до 40 мкм.

Скорость регистрации спектров с использованием систем с построением изображения обычно выше скорости регистрации спектров с использованием интегральных систем регистрации.

Однако если в интегральной системе регистрации используется высокочувствительный фотоприемник (например, ФЭУ), регистрация

аналогичного слабого светового потока может быть произведена с большой скоростью.

При регистрации достаточно слабых световых потоков для систем с построением изображения необходимо увеличивать время экспозиции. Системы регистрации с построением изображения обладают неоспоримым преимуществом по сравнению с интегральными системами при регистрации спектров быстропротекающих процессов, например, излучения импульсных лазеров.

## 8. Спектроскопия и радиометрия ионизирующего излучения

### 8.1. Введение в физику ионизирующих излучений

Процессы взаимодействия электромагнитного излучения и ускоренных частиц с веществом несут важную информацию о строении вещества и различных процессах и явлениях, сопровождающих это взаимодействие.

Бурное развитие в начале прошлого столетия исследований в области атомной и ядерной физики привело к развитию экспериментальных исследований, ориентированных на изучение такого типа взаимодействий.

Разработанные на сегодняшний день в этой области методы исследований, широкий спектр аппаратных ресурсов интенсивно используются в различных областях науки и техники. Наиболее распространенными приложениями являются радиометрия и спектрометрия ионизирующих излучений.

Под ионизирующим излучением понимают излучение, взаимодействие которого со средой приводит к ионизации атомов и молекул и образованию электрических зарядов разных знаков. В целом ионизирующее излучение может быть представлено как поток заряженных и (или) незаряженных частиц, электромагнитных квантов и подразделяется на: гамма излучение, характеристическое, тормозное, рентгеновское и корпускулярное.

*Гамма излучение* – электромагнитное излучение (фотонное излучение), возникающее при ядерных превращениях или при аннигиляции частиц.

*Характеристическое излучение* – электромагнитное излучение (фотонное излучение) с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния атома.

*Тормозное излучение* – электромагнитное излучение (фотонное излучение) с непрерывным энергетическим спектром, испускаемое заряженной частицей при ее взаимодействии (рассеянии, торможении) с электрическим полем.

*Рентгеновское излучение* – электромагнитное излучение (фотонное излучение), состоящее из тормозного и характеристического излучений.

*Корпускулярное* – представляет собой потоки частиц (электронов, протонов, позитронов, нейтронов и др.).

Гамма-излучение – это коротковолновое электромагнитное излучение. На шкале электромагнитных волн оно граничит с жестким рентгеновским излучением, занимая область более высоких частот. Гамма-излучение обладает чрезвычайно малой длиной волны ( $\lambda < 10^{-8}$  см) и вследствие этого ярко выраженными корпускулярными свойствами, т.е. ведет себя подобно потоку частиц – гамма-квантов, или фотонов, с энергией  $h\nu$ . Излучение возникает при распадах радиоактивных ядер, элементарных частиц, при аннигиляции пар частица-античастица, а также при прохождении быстрых заряженных частиц через вещество.

Гамма-излучение, сопровождающее распад радиоактивных ядер, испускается при переходах ядра из более возбужденного энергетического состояния в менее возбужденное или в основное состояние. Энергия  $\gamma$ -кванта равна разности энергий  $\Delta\varepsilon$  состояний, между которыми происходит переход. Испускание ядром  $\gamma$ -кванта не влечет за собой изменения атомного номера или массового числа, в отличие от других видов

радиоактивных превращений. Ширина линий гамма-излучений чрезвычайно мала ( $\sim 2-10$  эВ). Поскольку расстояние между уровнями во много раз больше ширины линий, спектр гамма-излучения является линейчатым, т.е. состоит из ряда дискретных линий. Анализ спектров гамма-излучения позволяет установить энергии возбужденных состояний ядер. Гамма-кванты больших энергий испускаются при распадах некоторых элементарных частиц. Гамма-излучение при распаде элементарных частиц также образует линейчатый спектр. Однако испытывающие распад элементарные частицы часто движутся со скоростями, сравнимыми со скоростью света. Вследствие этого возникает доплеровское уширение спектральной линии и спектр гамма-излучения оказывается размытым в широком интервале энергий. Гамма-излучение обладает большой проникающей способностью, т.е. может проникать сквозь большие толщи вещества без заметного ослабления.

Рентгеновское излучение – коротковолновое излучение, занимающее область между ультрафиолетовым и гамма-излучением, с длиной волны в пределах от  $10^2$  до  $10^{-3}$  нм. Существует условное деление рентгеновского излучения: при длинах волн  $\lambda < 0.2$  нм – «жесткое», при  $\lambda > 0.2$  нм – «мягкое».

Излучение, образующееся при прохождении быстрых заряженных частиц через вещество, вызывается их торможением в кулоновском поле атомных ядер вещества. Тормозное рентгеновское излучение характеризуется сплошным спектром, верхняя граница которого совпадает с энергией заряженной частицы, например электрона.

В ускорителях заряженных частиц спектр рентгеновского излучения может достигать максимальной энергии в несколько десятков ГэВ.

В дальнейшем для всех типов ионизирующего излучения будем использовать единый термин – «излучение», ввиду того, что закономерности их взаимодействия с веществом имеют много общего как при процессе поглощения, так и при рассеянии.

При прохождении излучения через вещество коэффициент поглощения складывается из коэффициента истинного поглощения, соответствующего полному переходу энергии квантов в другие формы энергии, и коэффициента рассеяния, характеризующего долю квантов, изменивших свое направление и частоту вследствие взаимодействия с электронами атомов.

Интенсивность пучка квантов после прохождения слоя вещества толщиной  $x$  определяется соотношением

$$I = I_0 e^{-n\sigma_0 x} = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\mu' \rho x}, \quad (8.1)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего пучка ( $x = 0$ );  $n$  – число атомов в  $1 \text{ м}^3$  вещества;  $\sigma_0$  – полное сечение поглощения;  $\mu = n\sigma_0$  ( $\text{м}^{-1}$ ) – линейный коэффициент поглощения;  $\mu'$  – массовый коэффициент поглощения ( $\text{м}^2/\text{кг}$ );  $\rho$  – плотность вещества ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ). Величины  $\mu$  и  $\mu'$  зависят от природы поглощающего и рассеивающего вещества и энергии падающих квантов.

Рассмотрим основные процессы, происходящие при взаимодействии излучения с веществом: фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект), комптоновское рассеяние (Комптон-эффект) и образование пар (электрон-позитрон). Полное сечение поглощения является суммой парциальных сечений, характеризующих различные возможные механизмы поглощения,

$$\sigma_0 = \sigma_\phi + \sigma_k + \sigma_p, \quad (8.2)$$

где  $\sigma_\phi, \sigma_k, \sigma_p$  –соответственно сечения фотоэффекта, Комптон-эффекта, образования пар.

Линейный коэффициент ослабления для рассмотренных процессов может быть определен из следующего выражения:  $\mu = \left(\frac{\rho Z N_A}{A}\right)(\sigma_\phi + \sigma_k + \sigma_p)$ , где  $\rho$  – плотность вещества,  $N_A$  – число Авогадро,  $A$  - атомная масса. Величина, обратная  $\mu$  –соответствует длине свободного пробега фотона в веществе.

Массовый коэффициент ослабления -  $\mu' = \frac{\mu}{\rho}$  для сложного вещества определяется путем усреднения массовых коэффициентов ослабления, составляющих вещество атомов с массами, соответствующими их долевого содержанию в веществе:  $\mu' = \sum_i \eta_i \mu_i$ , где  $\eta_i$  - доля  $i$ -го элемента с массовым коэффициентом  $\mu_i$ .

На рис. 8.1 представлена зависимость линейного коэффициента поглощения и его составляющих  $\mu_\phi, \mu_k, \mu_p$  от величины энергии квантов излучения для вещества NaI.

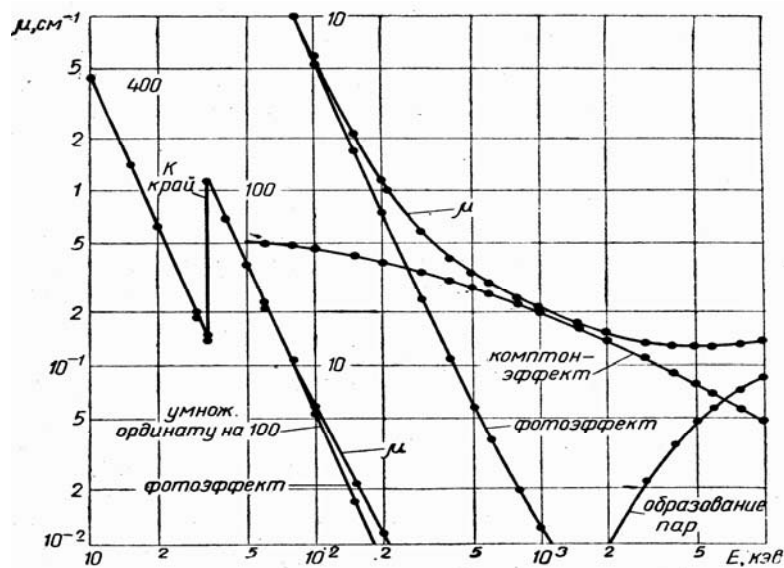
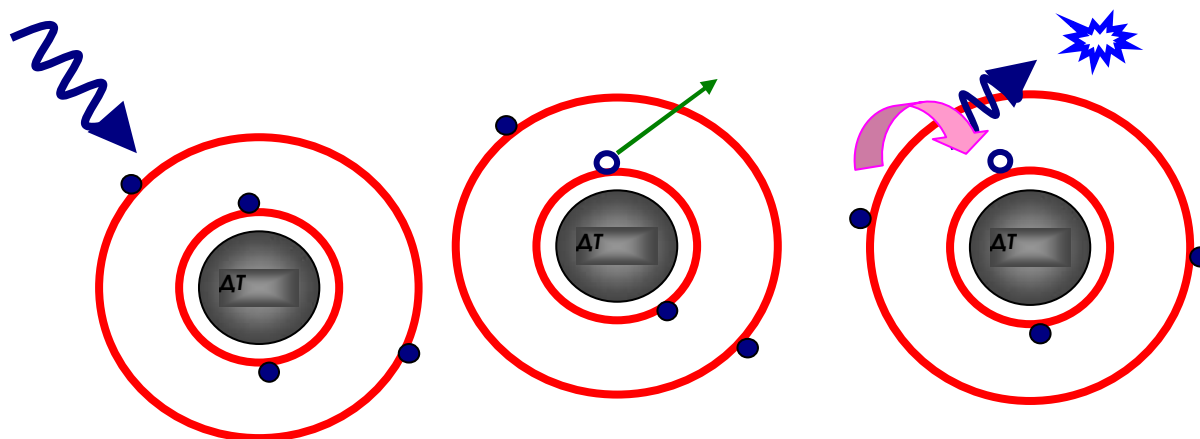


Рис. 8.1



При фотоэффекте происходит поглощение кванта излучения одним из электронов атома, причем энергия кванта преобразуется (за вычетом энергии связи электрона в атоме) в кинетическую энергию электрона, вылетающего за пределы возбужденного атома. Возбужденный атом переходит в основное состояние, испуская квант излучения. Фотоэффект происходит в том случае, если энергия фотона  $h\nu$  превосходит энергию связи электрона с которым взаимодействует фотон  $E_{св}$  на конкретной оболочке. Баланс энергии при фотоэлектрическом поглощении имеет вид  $h\nu = E_{св} + E_{к}$ , где  $E_{к}$  - кинетическая энергия вылетевшего электрона. При выполнении этого равенства вероятность взаимодействия выше для электронов, у которых большая энергия связи. В этой связи более чем с 80%-ой вероятностью это взаимодействие происходит с электронами К-оболочки.

На рис.8.2 представлена иллюстрация процесса фотопоглощения.



Гамма-квант взаимодействует с материалом детектора

Гамма-квант поглощается и «выбивается» электрон с внутреннего уровня

Переход внешнего электрона на вакантное место нижнего уровня, испуская фотон

Рис. 8.2

Вероятность фотоэффекта зависит от соотношения между частотой падающего излучения и резонансными частотами атомов. Эти частоты для внутренних электронов отвечают области излучения с энергией фотона в интервале 0,001÷0,1 МэВ и возрастают пропорционально квадрату заряда ядра, т.е.  $\sim z^2$ . Для более жесткого излучения ( $h\nu > 0,1\text{МэВ}$ ) вероятность фотоэффекта  $\sigma_{\text{ф}} \sim Z^4 / (h\nu)^3$ , для еще более жесткого излучения ( $h\nu > 0,5\text{МэВ}$ )  $\sigma_{\text{ф}} \sim Z^5 / h\nu$ .

Таким образом, фотоэффект преобладает в области малых энергии квантов излучения ( $\leq 100\text{кэВ}$ ).

Комптон-эффект происходит при рассеянии кванта излучения на одном из электронов, слабо связанных в атоме. В отличие от фотоэффекта, при Комптон-эффекте квант излучения не исчезает, а лишь изменяет энергию (длину волны) и направление распространения. Узкий пучок квантов излучения в результате Комптон-эффекта становится более широким, а само излучение – более мягким (длинноволновым).

На рис. 8.3 представлена иллюстрация Комптон-эффекта.



Рис. 8.3

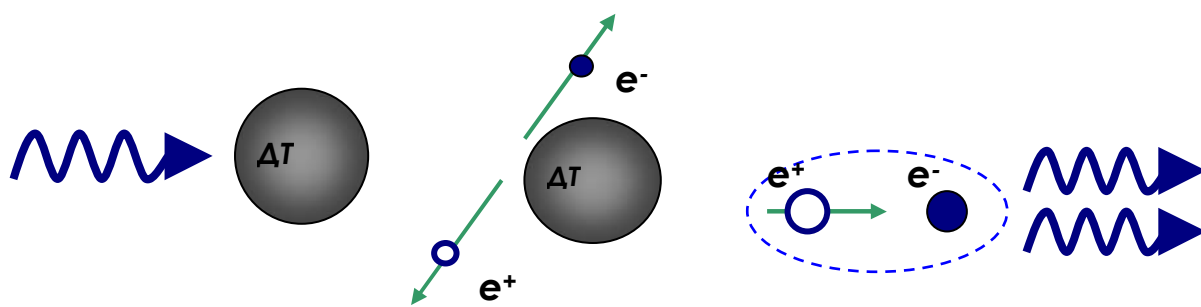
При комптоновском взаимодействии часть энергии фотона передается электрону, а сам фотон изменяет направление своего движения (рис. 8.3). Угол отклонения  $\theta$ , энергия фотона до рассеяния –  $E_0$  и после

рассеяния –  $E$  связаны соотношением:  $\frac{E_0}{E} = 1 + \alpha(1 - \cos \theta)$ , где  $\alpha = \frac{E_0}{m_0 c^2}$ ,  $m_0$

- масса покоя электрона. Угол между направлением движения первичного фотона и рассеянного изменяется в пределах  $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ .

Из выражения видно, что максимальная потеря энергии фотона происходит при рассеянии назад ( $\theta = 180^\circ$ ). Таким образом, вне зависимости от энергии первичного фотона, энергия фотона, рассеянного назад не может превышать 0.255 МэВ. Дифференциальное сечение комптоновского рассеяния, отнесенное к единице телесного угла на один электрон, рассчитывается на основании формулы Клейна-Нишины-Тамма.

Интенсивность комптоновского рассеяния пропорциональна числу электронов в  $1 \text{ см}^3$  вещества и поэтому вероятность этого процесса пропорциональна атомному номеру вещества. Так, в случае Рb вероятность комптоновского рассеяния сравнима с вероятностью фотоэлектрического поглощения при энергии  $\sim 0,5 \text{ МэВ}$ .



Квант взаимодействует с ядром      Фотон исчезает      и      Процесс аннигиляции образует электрон-позитронная пара

Рис. 8.4

Процесс образования электрон-позитронных пар становится возможным в электрическом поле ядер. Образование электрон-позитронных пар типично пороговая реакция, идущая при энергии кванта излучения, превышающей 1,02 МэВ. Пороговая энергия для образования пар в поле ядра -  $E_{пор} = 2m_0c^2 = 1,022\text{МэВ}$ , в поле электрона -  $E_{пор} = 4m_0c^2 = 2,044\text{МэВ}$ . На рис. 8.4 представлена иллюстрация процесса образования электрон-позитронных пар. Вероятность образования пар в поле ядра пропорциональна квадрату атомного номера, а в поле электронов пропорциональна атомному номеру и увеличивается с ростом  $h\nu$ . Поэтому при  $h\nu \sim 10$  МэВ основным процессом в любом веществе оказывается образование пар.

Радиационно-индуцированные в веществе изменения и эффекты их сопровождающие несут информацию об интегральных и спектральных характеристиках поля излучения изучаемого источника. Тем самым образец вещества (чувствительный объем) может быть использован для детектирования характеристик радиационного поля источника излучения. Это позволяет эффективно использовать данный метод в качестве пассивного средства диагностики при изучении процессов, происходящих в источнике излучений.

Существует значительное число типов детекторов и блоков детектирования, разработанных на их основе, эффективно работающих в различных диапазонах длин волн.

Имея в виду дальнейшую специализацию выпускников кафедры, ориентированных в большей части своей в области физики плазмы, основное внимание в данном разделе будет уделено фотонным типам излучений, и в первую очередь рентгеновскому излучению. Кроме того, последующая экспериментальная работа при проведении процедур

калибровки измерительной аппаратуры требует использования спектрометрических источников гамма-излучения. В этой связи общие вопросы раздела будут затрагивать область, включающую в себя рентгеновское и гамма-излучение с энергиями не выше 0,5 МэВ. Поэтому основное внимание будет уделено детекторам (ДТ), эффективно функционирующим в этой области энергий. Наиболее широкое распространение получили сцинтилляционные и полупроводниковые блоки детектирования.

## 8.2. Общие принципы построения спектрометров

Спектрометры включают два основных компонента: блок детектирования и многоканальный анализатор импульсов.

Блок детектирования включает в себя детектор и электронику, осуществляющую преобразование радиационно-индуцированных изменений в чувствительном объеме детектора в импульс напряжения, величина которого (интенсивность сцинтилляций, зарядовый импульс) пропорциональна энергии кванта излучения.

Многоканальный анализатор импульсов осуществляет спектральный анализ периодических или статистически распределенных импульсов по амплитудам, а также накопление информации.

Общими характеристиками блоков детектирования и спектрометров построенных на их основе являются:

Эффективность – это вероятность регистрации частицы при попадании в рабочий объем детектора, величина, равная отношению числа зарегистрированных квантов излучения  $N$  к числу квантов, попавших на ДТ  $N_t$ ,  $\varepsilon(E_\gamma) = \frac{N}{N_t} \cdot 100\%$  при данной энергии кванта излучения. Данные об

эффективности регистрации существенным образом зависят от типа ДТ и его конструктивных особенностей. На рис. 8.5, а представлены зависимости эффективности регистрации для различных типов детекторов.

Временное разрешение – минимальный интервал времени между прохождением двух частиц, которые регистрируются как отдельные события.

Мертвое время – интервал времени после регистрации частицы, в течение которого детектор остается нечувствительным.

Энергетическое разрешение -  $R(E_\gamma) = \frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma} \cdot 100\%$ , где  $\Delta E_\gamma$  - полная ширина

на полувысоте пика (FWHM, Full Width of Half Maximum),  $E_\gamma$  - энергия гамма квантов (рис. 8.5, б). Поскольку энергетическое разрешение зависит от энергии (оно пропорционально  $E^{-1/2}$ ), обычно определяется по пику полного поглощения для энергии гамма-линии Cs-137 (661 кэВ). На рис. 8.5, в представлены зависимости разрешающей способности от энергии квантов излучения для наиболее распространенных детекторов.

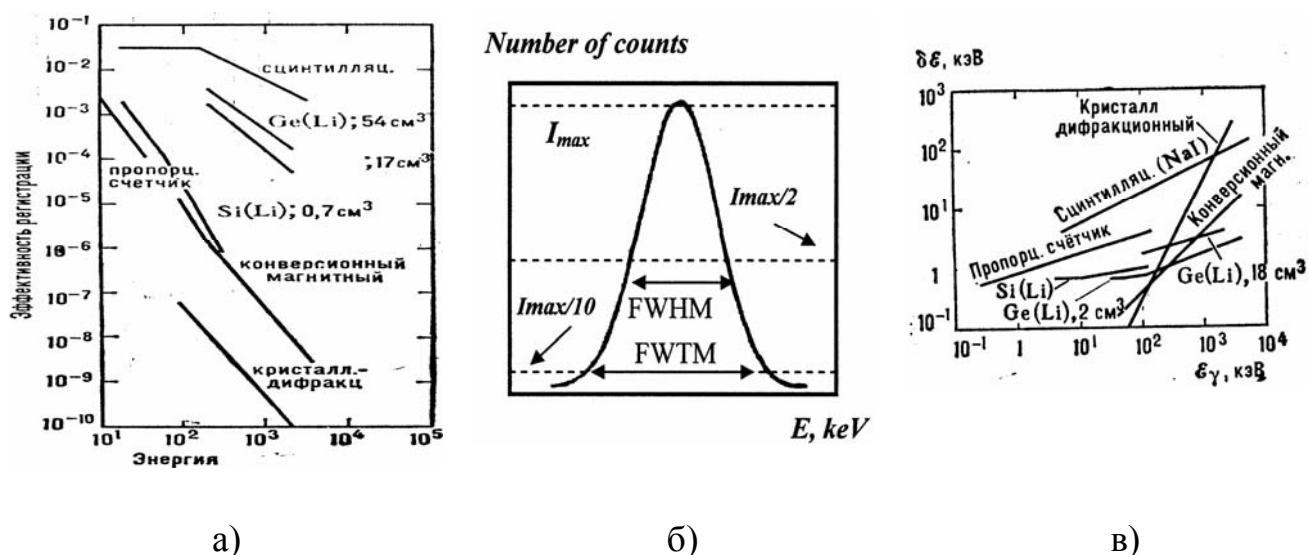


Рис. 8.5

Тот факт, что кванты излучения при разных процессах взаимодействия оставляют в БД различную долю своей первоначальной энергии, обуславливает появление на выходе спектрометра импульсов с различными амплитудами, меньшими амплитуды, соответствующей полному поглощению энергии квантов, это отражается в искажении гауссовой формы пика и может быть оценено по отклонению отношения ширин на полувысоте и на уровне 1/10 от максимума (FWTM/FWHM, рис. 8.5). Согласно распределения Гаусса, эта величина составляет 1.82. Таким образом, если  $FWTM/FWHM > 2$ , то необходимо определять причины сказывающихся на неточности измерений – проверка всех узлов БД, вплоть до замены детектирующей части.

### 8.3. Сцинтилляционные детекторы

При попадании кванта излучения в сцинтиллятор образуется свечение в оптическом диапазоне, называемое *сцинтилляцией*. Излученный свет в спектральном диапазоне прозрачности сцинтиллятора при помощи светопровода собирается на катод фотоприемника. Фотографии общего вида и принципиальная схема сцинтилляционного блока детектирования показаны на рис. 8.6.

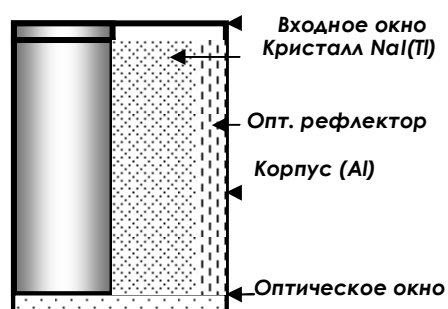
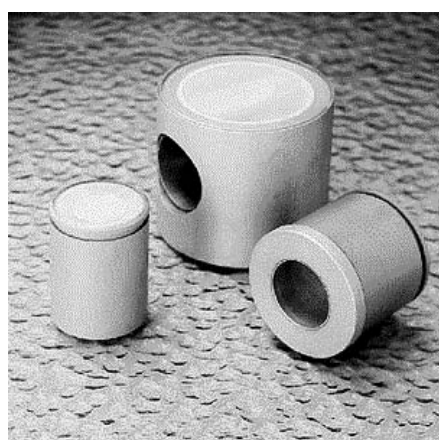


Рис. 8.6

Традиционно в сцинтилляционных блоках детектирования в качестве приемника применяют фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). ФЭУ преобразует свет в поток электронов, который усиливается *динодной системой* за счет механизма вторичной электронной эмиссии (рис. 8.7). Таким образом, каждый квант излучения, поглощенный в сцинтилляторе, образует импульс тока в анодной цепи ФЭУ. Анодный токовый сигнал ФЭУ – через согласующее устройство (эмиттерный повторитель) и усилитель или непосредственно - подается на вход измерительного прибора. В зависимости от требований эксперимента, а точнее измеряемой величины (среднее значение анодного тока, скорость счета импульсов тока, амплитудный анализ) различают токовый и счетный режимы сцинтилляционного детектора.

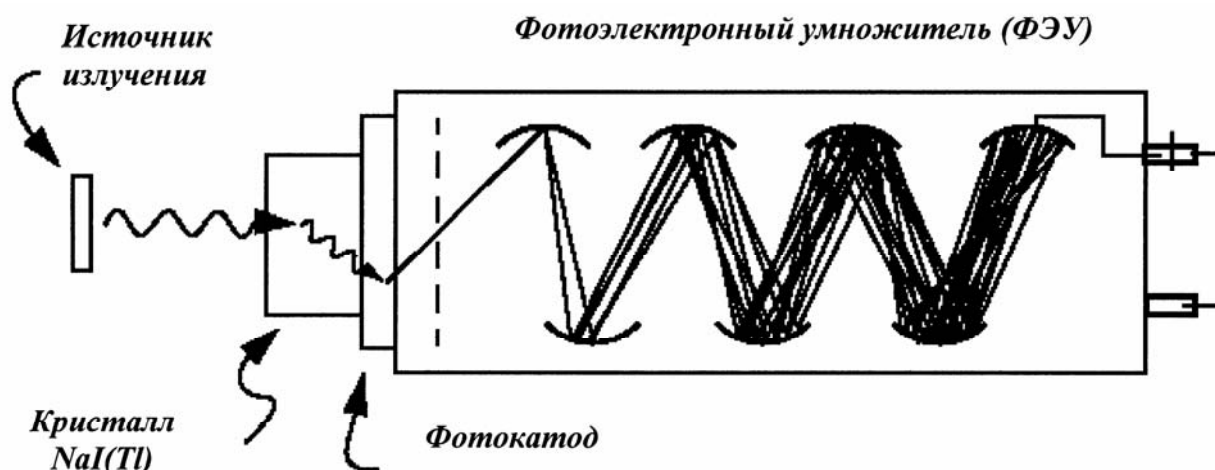


Рис. 8.7

Процесс сцинтилляции:

- поглощение ионизирующего излучения;
- передача части поглощенной энергии центрам люминесценции с их возбуждением в излучающее состояние;
- излучательный возврат с некоторой эффективностью центра люминесценции в основное состояние.



Сцинтилляторы можно разделить на несколько групп: газообразные (в основном инертные газы), органические - жидкие и пластические, органические кристаллы, неорганические кристаллы.

Наиболее широко распространенными являются неорганические сцинтилляторы — монокристаллы некоторых неорганических соединений *NaI*, *CsI* и др. При изготовлении кристаллов часто в их состав вводят активаторы (специальные примеси), которые увеличивают плотность центров люминисценции. Одним из лучших сцинтилляторов является *NaI(Tl)*.

Этот тип детектора имеет самую высокую конверсионную эффективность и малое время высвечивания —  $2,5 \cdot 10^{-7}$  с. Ниже в табл. 8.1 приведены характеристики наиболее часто применяемых неорганических сцинтилляторов.

Таблица 8.1

Параметр	NaI(Tl)	CsI(Na)
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3.76	4.51
Zэф	51	54
Световыход	$38 \cdot 10^3$ фотон на МэВ	15÷20% от выхода NaI(Tl)
Энергетическое разрешение	8.5 % по линии Cs-137 для детектора 50×150мм	10 % по линии Cs-137 для детектора 50×150мм
Время высвечивания, мкс	0,25	0.5
Максимум полосы пропускания, ангстрем	4100	5600

На рис. 8.8 представлены экспериментальные зависимости эффективности регистрации и энергетического разрешения сцинтилляционных блоков детектирования с кристаллами CsI(Tl) – 10x10x7 мм<sup>3</sup>, NaI(Tl) – 10x10x20 мм<sup>3</sup> с ФЭУ – Hamamatsu RI 306.

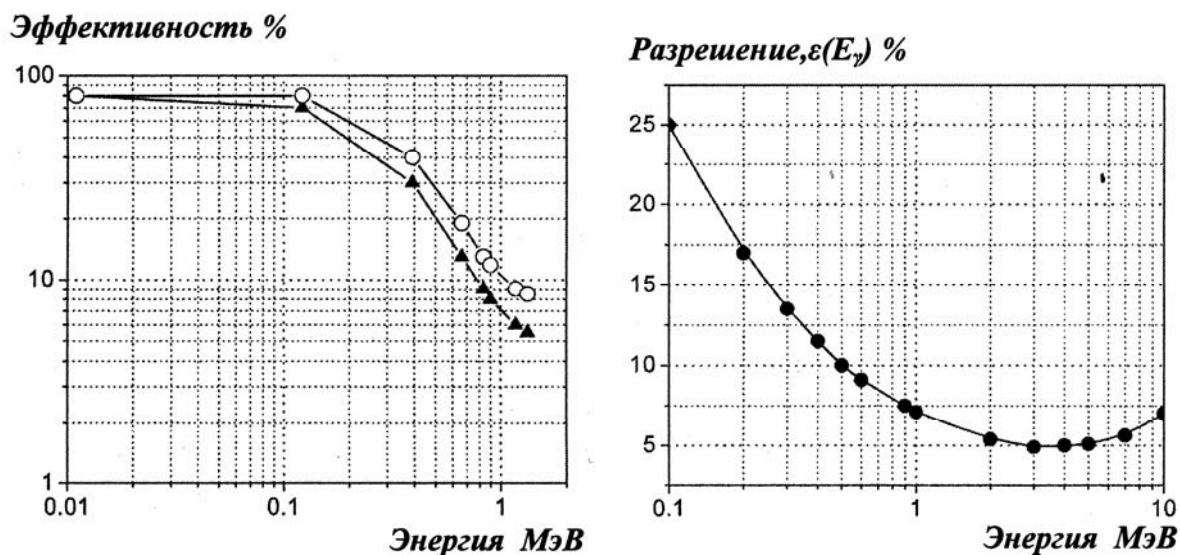


Рис. 8.8

В сцинтилляционной спектрометрии используются следующие термины и понятия:

Конверсионная (сцинтилляционная) эффективность  $\alpha = \frac{\bar{n}_\phi h \bar{\nu}}{E_0}$  –

отношение энергии световой вспышки к энергии, выделившейся при регистрации кванта. От этой характеристики зависит в основном энергетическое разрешение. Значения  $\alpha$  зависят от типа сцинтиллятора и изменяются в пределах от 0,01 до 0,3. Техническая конверсионная эффективность применяемого для работы в лаборатории сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) составляет 10%;

Средняя энергия образования фотона  $\bar{\omega}_\phi = \frac{E_0}{\bar{n}_\phi}$  - отношение энергии, выделившейся при регистрации кванта к среднему числу зарегистрированных фотонов;

Время высвечивания – среднее время жизни, которым характеризуются возбужденные состояния атомов. Может быть также определено как временной интервал, в течение которого интенсивность вспышки затухает в  $e$  раз. Эта характеристика сцинтиллятора определяет предельно достижимую скорость счета.

К появлению сцинтилляционной вспышки в диапазоне энергий до 1,5 МэВ могут приводить: фотоэффект, комптон-эффект, образование пар.

Поскольку сечение фотоэффекта пропорционально  $Z^2$ - $Z^4$ , высокой эффективностью регистрации излучения обладают сцинтилляторы, содержащие химические элементы с большим  $Z$  (NaI(Tl), CsI(Tl)). Поскольку энергия кванта практически полностью переходит в кинетическую энергию фотоэлектрона, которая расходуется в веществе сцинтиллятора, интенсивность люминесцентной вспышки, а следовательно амплитуда импульса тока с ФЭУ, пропорциональна энергии кванта излучения.

При Комптон-эффекте часть энергии первичного кванта передается электрону (и поглощается веществом сцинтиллятора, давая вспышку, соответствующую энергии, меньшей чем энергия первичного кванта), а оставшаяся часть энергии в виде фотона либо поглощается в сцинтилляторе, либо выходит из него.

В экспериментах, проводимых в практикумах и последующей исследовательской работе, регистрируемый спектр излучений ограничен

энергиями порядка 1 МэВ, поэтому вкладом эффекта образования пар в суммарный коэффициент поглощения можно пренебречь.

В лабораториях практикума по данному курсу применяется NaI(Tl)-сцинтилляционные блоки детектирования (БДЭГ-17, БДЭГ-23) с кристаллами 20x20 и 40x40.

Требования, предъявляемые к сцинтилляторам:

- a) световой выход должен быть велик;
- b) прозрачность для света собственной люминесценции;
- c) длина волны вспышек должна лежать в области чувствительности фотокатода ФЭУ;
- d) сцинтиллятор должен обладать малой инерционностью.

Из вышеизложенного следует, что с помощью сцинтилляционного спектрометра может быть измерена энергия квантов монохроматического излучения по положению пика полного поглощения, если имеется градуировочная кривая, связывающая амплитуду импульсов на входе электронного устройства с энергией кванта излучения, попадающего на кристалл спектрометра.

#### **8.4. Полупроводниковые детекторы SI(LI)-ППД**

Как и в сцинтилляционной спектрометрии, в основу полупроводниковой положен так называемый «ионизационный» принцип регистрации излучения. Мерой энергии кванта излучения служит заряд, генерируемый при торможении (поглощении) в рабочем объеме полупроводника.

Полупроводниковый детектор (ППД) представляет собой слой с p-n (p-i-n) переходом, заключенным между электродами, на которые подается напряжение. При попадании кванта излучения в результате взаимодействия (ионизации) образуются неравновесные носители заряда

(электроны, дырки), движущиеся к электродам под воздействием приложенного напряжения. В результате в электрической цепи протекает импульс тока, преобразующийся в импульс напряжения, амплитуда которого пропорциональна энергии падающего кванта. Обязательным условием регистрации возникающего импульса напряжения, читай заряда, возникшего в результате взаимодействия, является малая величина темнового тока детектора, т.е. применяемый полупроводник должен обладать высоким удельным сопротивлением.

Для регистрации квантов излучения, принадлежащих рентгеновскому диапазону (до 100 кЭВ), широко используются планарные Si-детекторы.

В процессе взаимодействия квантов излучения в полупроводнике генерируются электронно-дырочные пары. Принцип работы Si(Li)-ППД (p-i-n детектора) показан на рис. 8.9, а, а его устройство на рис. 8.9, б.

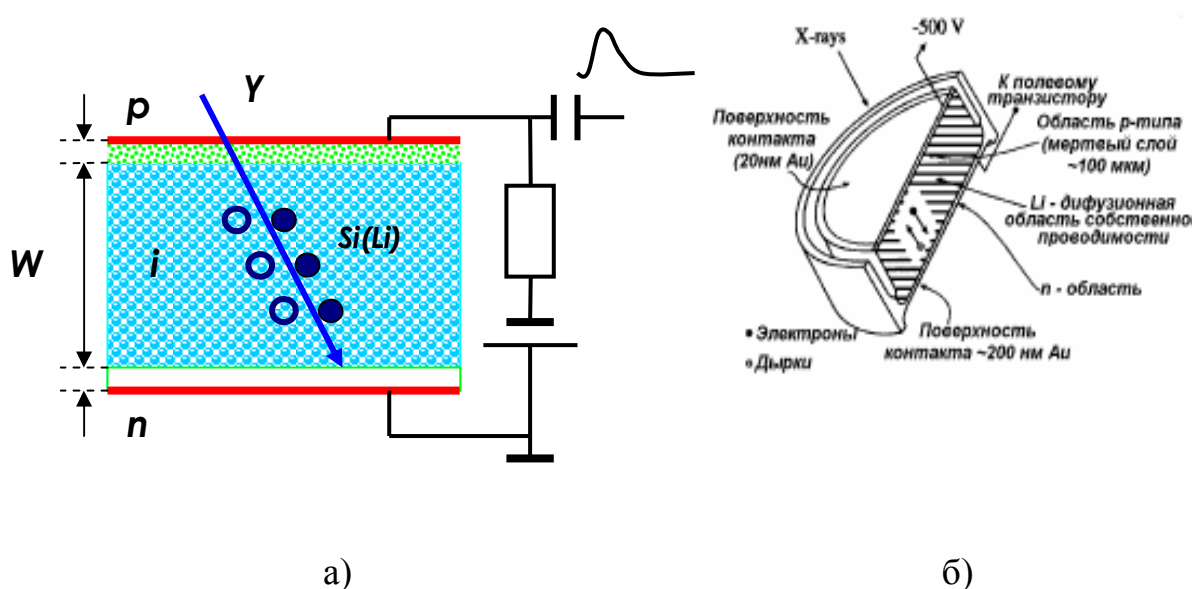


Рис. 8.9

В Si(Li)-ППД на образование пары требуется энергия  $\sim 3.8$  эВ при температуре жидкого азота. В ППД для эффективной регистрации

квантов излучения требуется толстая обедненная носителями область. Существенное увеличение обедненной области достигается компенсацией исходного материала до собственной ( $i$ ) проводимости. Для компенсации носителей в кремний посредством диффузии или ионной имплантации вводится Li с последующим отжигом для равномерного его распределения и устранения радиационных дефектов.

Для подавления диффузии в поле приложенного напряжения, которая бы способствовала разрушению p-i-n-структуры Si(Li)-ППД, связанной с высокой подвижностью ионов Li, требуется охлаждение детекторной части до температуры жидкого азота. Кроме того, это необходимо для подавления шумов каскада предварительного усиления зарядовых импульсов.

Поверхностные p- и n-области называют «мертвыми слоями». В этих областях Li полностью не компенсирует имеющуюся проводимость, и, как следствие, генерируемые электронно-дырочные пары быстро рекомбинируют и не дают вклада в зарядовый импульс. Рабочая область Si(Li)-ППД между двумя мертвыми слоями называется активным слоем.

При подключении ППД к источнику питания согласно рис. 8.9 (т.е. отрицательный полюс к p-области и положительный полюс к n-области) отрицательный зарядовый импульс, возникающий как следствие взаимодействия кванта излучения с ППД, может быть зарегистрирован. Амплитуда регистрируемого импульса на выходе детектора пропорциональна энергии рентгеновского кванта, генерирующего электронно-дырочную пару.

Для расширения рабочего спектрального диапазона и повышения эффективности регистрации в большинстве ППД применяются входные окна с малым значением  $\mu$ , слабее поглощающие низкоэнергетичные

кванты излучения. На рис. 8.10 представлены: полная энергетическая эффективность Si(Li) детектора для входных окон из различных материалов (а) и энергетическое разрешение Si(Li) детектора (б), включая шумы.

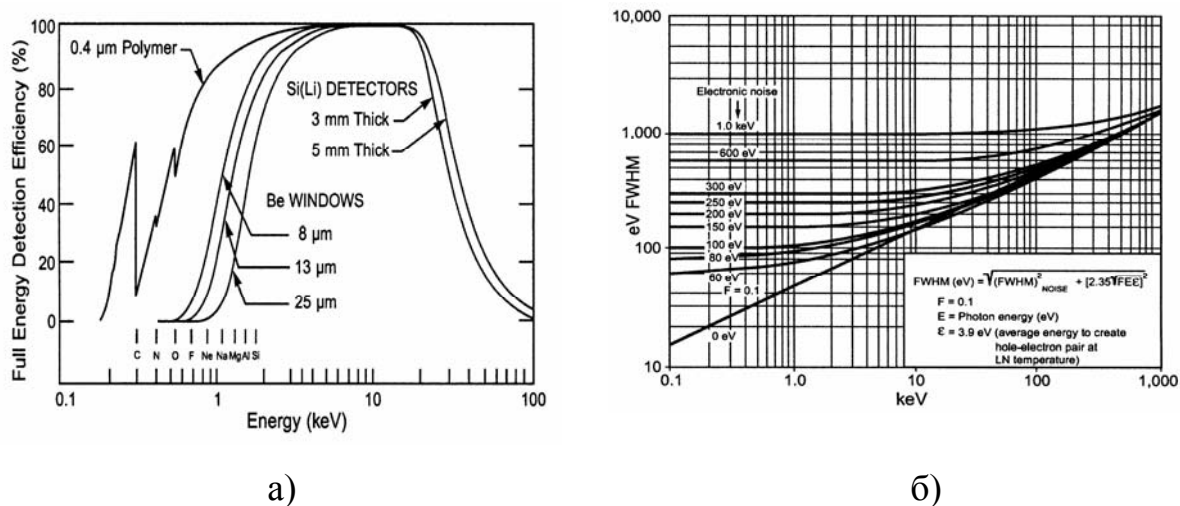


Рис. 8.10

Рабочий спектральный диапазон применяемого ППД соответствует 1–60 кэВ. Излучение в диапазоне меньше 1кэВ интенсивно поглощается во входном окне, так, что  $K\alpha$  - серия излучения от элементов ниже  $Z = 11$  (Na) не регистрируется.

Следует отметить, что ультратонкие окна делают из следующих материалов: полимер, алмаз, нитрид бора или нитрид кремния.

В лабораториях практикума по данному курсу применяется Si(Li)-ППД (ELSiX, Bruker-Baltic) с характеристиками, представленными в табл.8.2 .

Таблица 8.2

Параметр	Значение
Площадь чувствительной поверхности	20 мм <sup>2</sup>
Энергетическое разрешение (FWHM 5.9 кэВ)	165 эВ
Спектральный диапазон	1–60 кэВ
Толщина Ве-окна	12.5 мкм
Температура в криостате (электромеханическое охлаждение)	- 120 К
Отношение пик/фон	2000

Преимущества ППД: строгая пропорциональность амплитуды сигнала энерговыделению в детекторе в широком диапазоне энергий, малые толщины входного окна, нечувствительность к магнитному полю, высокое энергетическое и временное разрешение. В области малых энергий – ниже 25 кэВ Si(Li)-ППД обладает лучшим энергетическим разрешением, нежели CdTe, малым собственным шумом и высоким значением эффективности регистрации.

### 8.5. Спектрометрические измерения

Блок детектирования регистрирует кванты излучения и передает данные на спектрометрическое устройство. Полученные данные обрабатываются и по ним строятся энергетические гистограммы регистрируемого излучения, исследуемых образцов, данные которых помещаются в общую базу данных.

С помощью программных решений полученные базы данных могут быть использованы для определения спектральных характеристик излучения,



активности, т.е. числа распадов в единицу времени, а так же для дозиметрии ионизирующих излучений.

На рис. 8.11, *а* представлены фотографии детектора Si(Li)-ППД (Bruker-Baltic) и сопрягаемого спектрометрического устройства - MULTISPECTRUM, (рис.8.11, *б*), применяемого в научных исследованиях, при проведении практических занятий и НИРС. Также в лабораториях широко используются сцинтилляционные блоки детектирования БДЭГ-17 на основе кристалла NaI(Tl) размерами 30x20мм. Амплитудный анализатор как физический прибор в этом варианте отсутствует, его заменяет программное обеспечение которое, использует аппаратные возможности осциллографа (NI PXI-5122) и выполняет функции амплитудного анализатора импульсов (рис. 8.11, *в*).

Принцип построения спектрометров ионизирующих излучений для получения спектрального распределения энергии или временных характеристик излучения является одинаковым, за исключением некоторых особенностей, учитывающих тип применяемого детектора, как будет показано ниже. Основными узлами таких устройств являются: детектор, блок аналогового преобразования, включающий в себя узел согласования и усиления при необходимости, узел преобразования аналоговой информации в цифровую, узел накопления и обработки цифровой информации.



а)

б)

в)

Рис.8.11

Основным элементом такой измерительной схемы является многоканальный амплитудный анализатор. Устройство служит для измерения статистически распределенных по амплитуде сигналов, зарегистрированных от блока детектирования. Импульсы с блока детектирования через узел усиления и формирования, преобразующий их в сигнал, удобный для оцифровки, поступают на вход аналогово-цифрового преобразователя, который генерирует цифровой код, пропорциональный амплитуде (энергии кванта излучения) –  $A$ . Код определяет в многоканальном накопителе адрес ячейки памяти, в котором хранящемуся уже числу  $N_i$  добавляется единица. Полученное таким образом распределение отображается на экране дисплея.

Для достижения высокой точности измерений необходимо обеспечить не только рабочие характеристики узлов спектрометра, но и их неизменность (стабильность) при проведении экспериментов. Основными узлами, приводящими к искажению результатов, являются узлы аналогового преобразования ввиду реальной нестабильности характеристик элементной базы. Узлы цифровой обработки информации практически не вносят искажений в результаты измерений.

Узлы электронных преобразователей, следующие за детектором должны обладать линейными характеристиками, высокой скоростью преобразования, и не должны вносить искажений и дополнительных шумов в регистрируемые сигналы. Основной причиной нестабильности являются температурные зависимости элементов электронных схем и детектора, а также временной фактор – «старение», либо длительное время выхода на рабочие режимы. Эти факторы могут привести к нелинейности характеристик спектрометра и, как следствие, к смещению либо уширению спектральных пиков.

Основным принципом, положенным в основу современных спектрометров является использование схемы автоматической стабилизации.

В этой схеме реперные (опорные) сигналы проходят через весь спектрометр и испытывают те же отклонения, что и исследуемые сигналы, и сравниваются с эталоном, возникшие отклонения компенсируются.

Как правило, амплитуда импульсов с БД недостаточна для работы анализирующих устройств. В этой связи предусматривается применение предусилителей с коэффициентом усиления  $10^2-10^7$ , зависящим от типа применяемого детектора. Так, в случае ППД ввиду малости сигналов цепи предусилителя должны усилить и преобразовать сигнал без заметного ухудшения соотношения сигнал/шум. Для этого в спектрометре применяются зарядочувствительные предусилители на основе полевых транзисторов, которые с целью уменьшения шума охлаждаются совместно с детектором до низких температур. В Si(Li) ППД, который применяется в практикуме, предусилитель помещен в криостат, охлаждаемый до температуры – 120 К. В случае применения в качестве блока детектирования сцинтиллятора с ФЭУ, где сигналы достаточно велики,

блок предусиления может отсутствовать. Следующим блоком является спектрометрический (линейный) усилитель, задача которого – линейное увеличение амплитуд с БД до уровня 0.1-10 В, необходимых для эффективной работы амплитудного анализатора. Основным требованием к спектрометрическому усилителю является линейность характеристики.

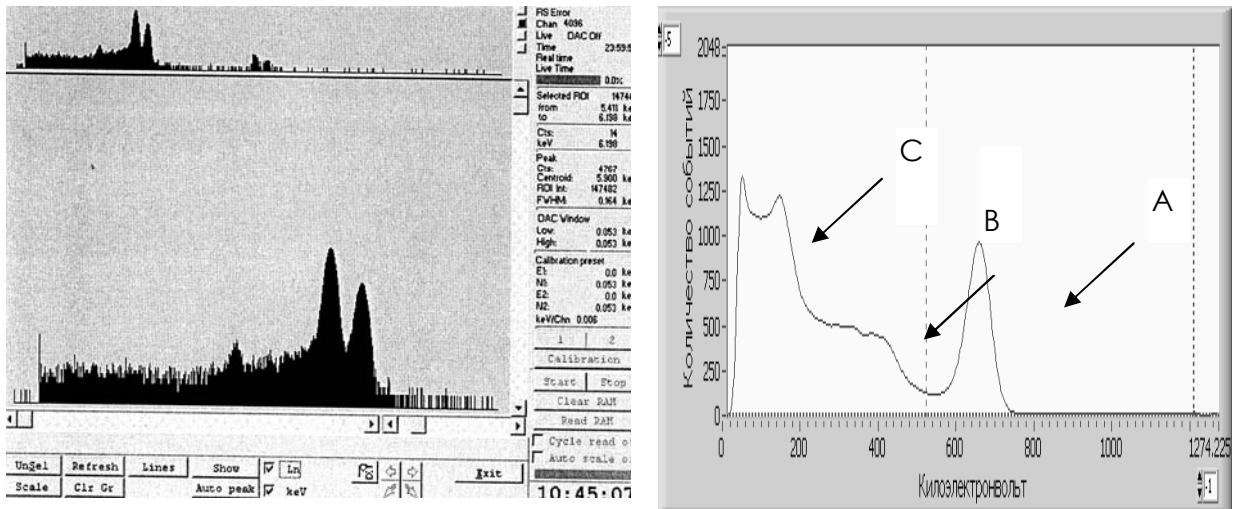
Как правило, основные измерительные характеристики амплитудного анализатора определяются характеристиками АЦП, число каналов – характеристиками преобразователя и устройства оперативной памяти.

Наиболее существенный параметр устройств формирования импульса – постоянная времени ( $\tau$ ). При малых значениях  $\tau$  (обычно несколько мкс) анализатор способен обрабатывать большую интенсивность поступающих импульсов, но это приводит к ухудшению точности амплитудного анализа, и, как следствие, ухудшению энергетического разрешения. Увеличение постоянной времени улучшает энергетическое разрешение, но обеспечивает малую скорость загрузки. Выбор постоянной времени происходит исходя из конкретных условий проводимого эксперимента.

Любое устройство затрачивает на регистрацию события и измерения его характеристик конечное время, в течение которого оно не способно «правильно» обработать следующее событие (эффект наложения). Для исключения этого эффекта по прибытии очередного импульса в течение менее чем 1 мкс электроника блокируется на какое-то время для обработки поступившего импульса и отказывается воспринимать следующие импульсы. Это время называется «мертвым временем» -  $\tau_m$ . «Живое время» -  $\tau_j$  - время, в течение которого спектрометр был открыт для регистрации. Обычно под «мертвым временем» понимается

относительное время, измеряемое в процентах  $\tau_m(\%) = [(t - \tau_{ж}) / \tau_{ж}] \times 100\%$ , где  $t$  – текущее время.

Наиболее подробно с принципами построения многоканальных спектрометрических устройств можно познакомиться в специальной литературе.



а) спектр от источника Fe-55 (FWHM 5.9 кэВ = 164 эВ, 3%)

б) спектр источника  $^{137}\text{Cs}$  (NaI(Tl) (FWHM 662 кэВ = 80 кэВ, 11%)

Рис. 8.12

Кроме функции анализа спектрометр отдельно выполняет целый пакет задач: занесение в файл данных для длительного хранения и последующей обработки, спектрометрическая калибровка, обработка спектрограммы в зонах интереса, выделение пиков в распределении, их идентификации, вычисление характеристик этих пиков - определение площади пика, вычитание фона и определение площади пика над фоном, определение положения центра пика, вычисление ширины пика на его полувысоте, а также определение ошибок измерения.

Тот факт, что кванты излучения при разных процессах взаимодействия оставляют в БД различную долю своей первоначальной

энергии, обуславливает появление на выходе спектрометра импульсов с различными амплитудами, меньшими амплитуды, соответствующей полному поглощению энергии квантов. На рис. 8.12, приведенном ниже, представлены типичные распределения импульсов по величине амплитуды, полученные с помощью спектрометров, применяемых в лабораториях.

По оси абсцисс отложена величина энергии, по оси ординат - относительная частота появления импульсов данной амплитуды.

Пик *A* называется *пиком полного поглощения*. Происхождение этого пика связано с процессом фотоэффекта. Энергия, приобретаемая сцинтиллятором при фотопоглощении кванта, равна  $h\nu - E_i$ , где  $h\nu$  - энергия кванта, а  $E_i$  - энергия ионизации атома. Поскольку  $E_i \ll h\nu$ , то энергия, соответствующая пику полного поглощения, практически равна энергии падающего кванта.

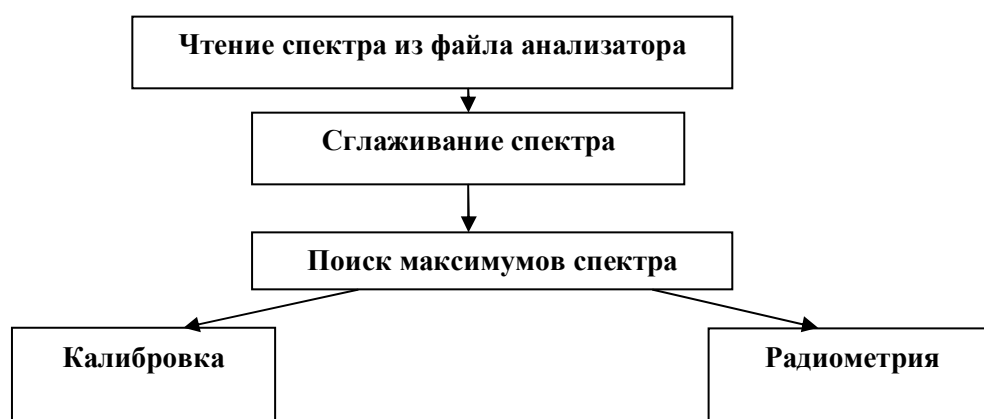
Непрерывное распределение импульсов между точками *B* и *C* создается электронами отдачи, возникающими при комптоновском рассеянии квантов излучения. Сравнительно резкий край спектра со стороны высоких амплитуд (энергий) обуславливается тем, что число электронов отдачи с энергиями, превышающими максимальную энергию, быстро падает практически до нуля; этот край определяется максимальной энергией, которую может передать фотон электрону.

В низкоэнергетической части спектра могут наблюдаться пики, связанные с характеристическим рентгеновским излучением вещества защитных элементов или вещества источника излучения.

За меру интенсивности моноэнергетического излучения принимается площадь под пиком полной энергии, т.е. число квантов, прошедших через

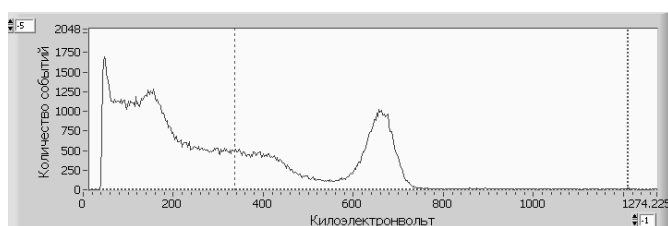
выбранное сечение за время измерений:  $I(E_\gamma) = \frac{S(E_\gamma)}{\varepsilon(E_\gamma)}$ , где  $S(E_\gamma)$  – площадь под пиком полной энергии.

Наиболее часто реализуемые операции по обработке и представлению регистрируемых спектров представлены в виде блок-схемы математических функций обработки спектров:

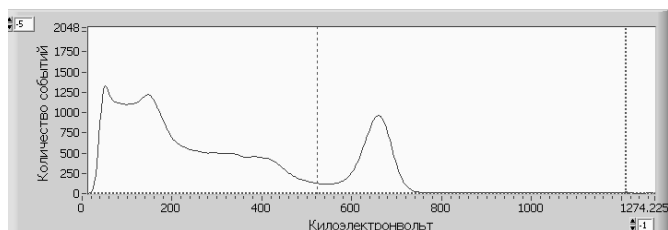


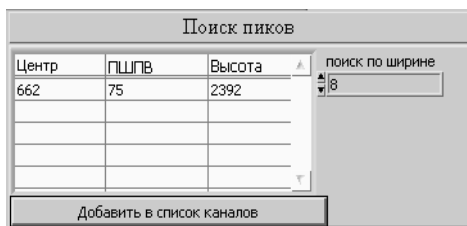
В качестве примера ниже приведена последовательность операций по обработке полученных спектров:

*Сглаживание спектра и поиск пиков.* Первоначально полученный спектр со статистическим шумом представлен ниже.



В результате сглаживания получается следующий вид спектра:





### *Поиск пиков полного поглощения.*

На поле спектра передвигаются два курсора, с их помощью можно задать интервал поиска пиков. Все найденные пики выдаются в таблице.

Найденные максимумы в общем случае не являются пиками полного поглощения, поскольку пик полного поглощения должен:

- быть симметричным;
- иметь форму нормального распределения;
- полная ширина на полувысоте (ПШПВ) пика должна совпадать с указанной в паспорте блока детектирования.

Другие максимумы спектра не являются пиками полного поглощения, они могут быть пиками обратного рассеяния, могут быть связаны с комптоновским эффектом. Чтобы определить является ли найденный максимум пиком полного поглощения, нужно произвести его проверку на соответствие нормальному распределению. Только тогда по ПШПВ пика можно говорить о пике полного поглощения.



## Литература

### Список использованной литературы к главе 1

1. *В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин.* Электрорадиоизмерения. - М.: Высшая школа, 1986. - 352 с.
2. *Х.-И. Кунце.* Методы физических измерений. - М.: Мир, 1989. - 213 с.
3. *Э. Ангерер.* Техника физического эксперимента. - Москва: Физмат, 1962. - 452 с.
4. *В.Д. Кукуш.* Электрорадиоизмерения. М.: Радио и Связь, 1985. - 368 с.

### Список использованной литературы к главе 2

1. *Е.С. Венцель.* Теория вероятностей. – М.: Физмат, 1962. - 564 с.
2. *Х.-И. Кунце.* Методы физических измерений. - М.: Мир, 1989. - 213 с.
3. *Дж. Тейлор.* Введение в теорию ошибок. - М.: Мир, 1985. - 272 с.

### Список использованной литературы к главе 3

1. *В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин.* Электрорадиоизмерения. - М.: Высшая школа, 1986. - 352 с.
2. Метрология и радиоизмерения: Учебник для вузов / *В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др. /Под ред. профессора В.И. Нефедова.* – М.: Высшая школа, 2003. – 526 с.
3. Измерения в электронике: Справочник / *В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.: Под ред. В.А. Кузнецова.* – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
4. *Мейзда Ф.* Электронные измерительные приборы и методы измерений. - М.: Мир, 1990 . - 535 с.

### Список использованной литературы к главе 4

1. *Л.Н. Розанов* Вакуумная техника. - М.: Высшая школа, 1990. - 320 с.
2. *В.В. Андреев, А.А. Балмашинов.* Лабораторный практикум «Экспериментальные методы в физике плазмы».-М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1994.

3. Дж. Уэстон Техника сверхвысокого вакуума. - М.: Мир, 1988. - 366 с.
4. Э Ангерер Техника физического эксперимента. - М.: Физмат, 1962. - 452 с.
5. Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др.; под общ ред . Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева Вакуумная техника: Справочник.- М.: Машиностроение, 1985. - 360 с.
6. С.М. Стариковская. Физические методы исследования. Семинарские занятия. Ч. 1.: Учебное пособие. – М.: изд-е МФТИ, 2001. - 88 с.
7. А.В. Ерюхин Основы вакуумных измерений - М.: «Машиностроение», 1977. - 40 с.
8. Интернет ресурсы <http://www.vacuum.ru/>

#### **Список использованной литературы к главе 5**

1. Калашиников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1970. – 668 с.
2. В.В.Филатов. ЖТФ. – 1997. - т.67.- №5.- с. 124-127.
3. Лагутин А.С., Ожогин В.И. Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Алиевский Б.Л., Орлов В.Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
5. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей.- М.: Наука, 1964.
6. Монтгомери Д.Б. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов: Пер с англ. - М.: Мир, 1971.
7. Паркинсон Д.Х., Малхолл Б.Е. Получение сильных магнитных полей. - М.: Атомиздат, 1971.
8. Страховский Г.М., Кравцов Н.В. Сильные магнитные поля УФН. – 1960. – LXX.- вып. 4.- с. 693-714.
9. Гайдуков Ю.П. Физические основы и методы получения магнитных полей. //Соросовский образовательный журнал. -1996.- № 4.- с. 97.

10. *В.В. Андреев, А.А. Балмашинов* Лабораторный практикум «Экспериментальные методы в физике плазмы».- М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1994.

11. *Лишевский В.* Наука и жизнь.- 1988.- №2.

#### **Список использованной литературы к главе 6**

1. *Фурман Э.Г.* Системы питания импульсных электромагнитов с емкостным накопителем// ПТЭ.- № 5.- 1988.- с.7-27.

2. *Калашиников С.Г.* Электричество.- М.: Наука, 1970. – 668 с.

3. *Г.Кнопфель* Сверхсильные импульсные магнитные поля: Пер. с англ.- М.: Мир, 1972. - 392 с.

4. *Лагутин А.С., Ожогин В.И.* Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. – М.: Энергоатомиздат, 1988.-192 с.

5. *Панин В.В., Степанов Б.М.* Измерение импульсных магнитных и электрических полей.- М.: Энергоатомиздат, 1987.- 120 с.]

#### **Список использованной литературы к главе 7**

1. *В.В. Лебедева.* Техника оптической спектроскопии.- М.: Изд-во МГУ, 1986.- 352 с.

2. *В.Н. Дулин и др.* Электронные приборы/ Под ред. Г.Г. Шишкина.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 496 с.

3. *А.А. Шишовский.* Прикладная физическая оптика. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1961.- 824 с.

4. *Т.К. Чехлова.* Методические рекомендации к выполнению лабораторной работы «Изучение работы фотодиода» по курсу «Электронные приборы».- М.: Изд-во РУДН, 1994.- 20 с.

5. *М.М. Гуревич.* Фотометрия (теория, методы и приборы).- Л.: Энергоатомиздат, 1983.- 272 с.

## Список использованной литературы к главе 8

1. Григорьев В.А., Колюбин А.А. Электронные методы ядерно-физического эксперимента: Учебное пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 336 с.
2. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Современные приборы для измерения ионизирующих излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 232 с.
3. Вяземский В.О., Ломоносов И.И. Сцинтилляционный метод в радиометрии. – М.: Госатомиздат, 1961. – 429 с.
4. Гребенщиков В.В. Детекторы ионизирующего излучения. - СПбГТУ, кафедра "экспериментальной ядерной физики", 2002.
5. Глушковский М.Е. Быстродействующие амплитудные анализаторы в современной ядерной физике и технике.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 128 с.
6. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник.- М.: Энергоатомиздат, 1982.
7. Савастенко В.А. Практикум по ядерной физике и радиационной безопасности. – Минск: Изд. «Дизайн ПРО», 1998. – 191 с.
8. Eiji Sakai Recent Measurements on scintillator-photodetector systems// IEEE Transaction on Nuclear science.- vol NS-34.- № 1.- February, 1987.- p. 422.
9. Интернет ресурсы:  
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html/>
10. Интернет ресурсы: <http://www.canberra.com>
11. Интернет ресурсы: <http://nuclphys.sinp.msu.ru>, Ядерная электроника для пользователей, Э. Кэбин

## ОПИСАНИЕ КУРСА И ПРОГРАММА

---

**Кредит: 4**

**Статус дисциплины:** СДБ (специальные дисциплины, обязательная)

(7 семестр бакалавриата, лекций – **36** часов, лабораторные (практические занятия) – **36** часов, самостоятельная работа студентов – **72** часа, зачет по лабораторному практикуму, экзамен, контрольное практическое задание, курсовая работа (по выбору).

### **Описание курса**

*Цель курса* – обеспечение базовой подготовки в области физического эксперимента; введение в теорию и методику современного физического эксперимента; изучение теоретических принципов организации и проведения физического эксперимента и метрологии; обучение основным методам математической статистики и их применению при обработке результатов измерений; ознакомление как с классическими, так и современными экспериментальными методами, измерительной техникой и научным лабораторным оборудованием; формирование практических навыков разработки и применения наиболее распространенных измерительных схем с учетом их функциональных особенностей; приобретение студентами знаний для самостоятельной работы при планировании и проведении физического эксперимента в рамках магистерской программы, затрагивающей наиболее динамично развивающиеся направления прикладной физики.

***Содержание курса*** – Общие вопросы измерений. Основные методы обработки и графического представления экспериментальных данных. Основы метрологии. Измерение постоянных и низкочастотных токов и напряжений. Измерение импульсных токов и напряжений. Измерения во временной области. Измерения в частотной области. Основные измерительные схемы (компенсационные и мостовые схемы). Принципы и методы согласования. Основы магнитометрии. Метрология в магнитометрии. Источники стационарных магнитных полей. Наиболее распространенные магнитные конфигурации. Генераторы импульсных магнитных полей. Измерение магнитных полей. Магнитометрические преобразователи. Основные понятия вакуумной техники. Молекулярно-кинетическая модель вакуума. Явления и процессы на границе вакуум-поверхность. Вакуумные материалы. Методы получения и измерения вакуума. Основы оптического спектрального анализа. Физика источников оптического излучения и их характеристики. Приемники оптического излучения. Оптические схемы и характеристики спектральных приборов. Общие вопросы радиометрии и дозиметрии ионизирующих излучений. Детекторы ионизирующих излучений. Основные измерительные схемы и их характеристики.

***Организационно-методическое построение курса.***

Курс состоит из лекций и практических занятий (лабораторных работ), предусмотрено выполнение контрольного практического задания или курсовой работы (по выбору). Поскольку программа курса предусматривает изучение широкого круга вопросов, часто составляющих содержание отдельных курсов, то из-за ограниченного объема часов рассматриваются лишь те вопросы, которые способствуют пониманию принципов организации и проведения физического эксперимента. Изложение курса базируется на большинстве разделов курсов высшей

математики (высшая алгебра, математический анализ, дифференциальные уравнения, методы математической физики), курсов общей и теоретической физики (квантовая механика, электродинамика, статистическая физика), входящих в учебный план обучения бакалавра классического университета по направлению подготовки – физика.

Лекции построены по принципу: от простого к сложному и реализуют непрерывную подготовку в рамках учебной программы, демонстрируя примеры конкретных межпредметных взаимосвязей. Лекции проходят с демонстрацией иллюстративного видеоматериала (слайдов и т.п.), с использованием мультимедийного проекционного оборудования, а также с демонстрацией функциональных особенностей обсуждаемых в курсе экспериментальных методов на виртуальных моделях или реально действующем лабораторном оборудовании.

Практические занятия проводятся в три этапа: 1) допуск к выполнению - проверка преподавателем самостоятельной работы студента, т.е. персональная проверка знаний вопросов связанных с тематикой предстоящей практической работы, подготовленных согласно методическим рекомендациям и предложенной литературе; 2) непосредственное проведение экспериментальных исследований, самостоятельная обработка результатов измерений, подготовка и написание отчета, согласно методическим требованиям; 3) обсуждение индивидуальных отчетов студентов по выполненной теме.

Для контроля и закрепления студентами полученных знаний необходимо проведение обязательных практических занятий: лабораторные работы, минимальное количество - 7 в семестр; 1 контрольное практическое задание или курсовая работа (по выбору). Предусмотрены: промежуточный контроль (аттестация), зачет по лабораторному практикуму и по окончании курса – экзамен.

### ***Освоив курс, студент должен:***

овладеть методами постановки современного физического эксперимента, научиться применять теорию ошибок при обработке результатов измерений и их представлении, включая использование современного программного обеспечения; получить представление об использовании сложного лабораторного оборудования на примере классических и оригинальных экспериментальных установок, а так же новейших средств измерений.

### ***Общие правила выполнения практических работ***

В рамках читаемого курса в физических лабораториях студенты выполняют лабораторные работы, количество которых определено учебным планом по дисциплине, а также выполняют самостоятельную исследовательскую работу - контрольное практическое задание или курсовую работу.

*Лабораторное занятие* - практическое учебное занятие, проводимое в учебных лабораториях с целью углубления знаний и приобретения навыков постановки и проведения эксперимента в области изучаемой дисциплины.

Объектом изучения при проведении лабораторных занятий является конкретный физический объект, рассматриваемый в предметной области курса. Объект изучения (электрофизический стенд, измерительный модуль, измерительный прибор) может представлять собой реальный объект или модель - виртуальную, физическую и т.д.

*Курсовая работа* является самостоятельной учебной работой – первым научным исследованием, в котором студентом раскрываются теоретические и практические проблемы выбранной темы.



Курсовая работа должна представлять собой, завершённый материал, в котором приведены результаты, раскрывающие закономерности взаимосвязей между изучаемыми явлениями и процессами, а так же содержать авторское видение и решение поставленной задачи.

Объектом исследований при выполнении курсовой работы является изучение физических явлений или процессов, при этом самостоятельно привлекаемые и используемые диагностические методы измерений, методы моделирования либо подходы теоретического изучения преимущественно основаны на знаниях полученных студентом в предшествующий период обучения или изучаемых самостоятельно. Результаты курсовой работы могут являться прологом будущей дипломной работы.

*Контрольное практическое задание* – самостоятельная учебная работа, направленная на постановку физического эксперимента, связанного с модернизацией и совершенствованием работ лабораторного практикума.

Контрольное практическое задание представляет, завершённый материал, в котором представлены результаты самостоятельной работы студента по разработке и постановке новых упражнений лабораторного практикума и связаны с совершенствованием постановки эксперимента, разработки новых схем измерений, повышения точности измерений или обработки экспериментальных данных и содержат авторское видение и решение поставленной задачи.

Объектом исследований при выполнении контрольного практического задания являются существующие и вновь создаваемые лабораторные стенды практикума «Измерения и приборы в физическом эксперименте».

## ***Организация лабораторного практикума***

### ***Общие правила:***

Лабораторные работы выполняются студентами согласно установленного в начале семестра расписания.

Лабораторная работа выполняется исследовательской группой, не превышающей 2 человека.

Количество лабораторных работ, выполняемых за учебное занятие, не превышает одну работу.

Перенос выполнения назначенной лабораторной работы допускается только в пределах расписания по согласованию с преподавателем.

При обнаружении схожих отчётов у различных исследовательских групп результаты работ и отчеты аннулируются, а студенты, сдавшие такие отчёты, переделывают работу в дополнительное время, в сроки, согласованные с преподавателем.

*К выполнению работы не допускаются учащиеся, которые:*

- не прошли аттестацию по технике безопасности;
- грубо нарушают правила внутреннего распорядка в лаборатории;
- не подготовились для выполнения лабораторной работы;
- опоздали к началу занятий;
- не защитили отчёт по предыдущей работе;
- пропустили два и более занятий без уважительной причины.

*Организация лабораторных занятий включает:*

- самостоятельную внеаудиторную подготовку студента в соответствии с методическими рекомендациями;
- первичный контроль преподавателем степени подготовленности каждого студента к выполнению лабораторной работы;
- выполнение всех заданий (упражнений) лабораторной работы в полном объеме;

- оформление отчета (см. структуру отчета и правила его оформления) и его защиту исследовательской группой в сроки, установленные преподавателем;
- учет преподавателем текущего и итогового рейтингов каждого из студентов по результатам выполнения и защиты им отдельных лабораторных работ.

*Студент имеет право:*

- получить необходимые для выполнения лабораторной работы методические материалы в бумажном или электронном видах;
- проводить лабораторные работы по оригинальным методикам при предварительном согласовании их с преподавателем;
- выполнить лабораторную работу, пропущенную по уважительной причине, в часы, согласованные с преподавателем.

*Студент обязан:*

- Самостоятельно, согласно методическим рекомендациям, подготовиться к выполнению лабораторной работы, и получить допуск к ее выполнению по результатам краткого опроса в начале занятий;
- Данные (условия экспериментов) и результаты измерений вносятся в протокол (персональный файл), выдаваемый преподавателем по результатам предварительного опроса;
- По выполнении экспериментальной части лабораторной работы студент предъявляет результаты измерений преподавателю. Они сохраняются в виде электронного файла на рабочем компьютере преподавателя. Копия файла остается у студента для оформления отчета (см. правила оформления отчётов);
- При пропуске занятия подготовиться к следующей по расписанию работе. Дату выполнения пропущенной работы необходимо согласовать с преподавателем.

*Студент несет ответственность:*

- за пропуск лабораторных занятий по неуважительной причине;
- за неподготовленность к выполнению работы;
- за несвоевременную сдачу отчетов и их защиту;
- за порчу имущества и нанесение материального ущерба лаборатории

*Преподаватель несет ответственность:*

- за качественную постановку и проведение лабораторных работ;
- за поддержание рабочей дисциплины и порядка в лаборатории;

*Преподаватель имеет право:*

- отстранять от проведения лабораторных работ студентов, нарушающих установленные выше правила;
- требовать от студентов пропустивших занятия разрешения из деканата факультета на посещение последующих лабораторных занятий;
- проводить перед началом лабораторных работ контрольный опрос студентов;
- вносить в случае необходимости (из-за отказа оборудования, измерительных или вычислительных средств и т. п.) частичные изменения в программу лабораторной работы.

**Категорически запрещено:**

- **Самостоятельно включать** экспериментальные стенды, без проверки преподавателем рабочей схемы измерений;
- **Использовать** для выполнения лабораторной работы приборы и устройства, не входящие в состав экспериментального стенда и не предусмотренные техническим заданием к выполнению;
- **Включать** не используемые в работе модули устройств, ручки и переключатели приборов;
- **Вскрывать** блок-схемы программно-аппаратных средств измерений и вносить в них изменения;

- **Включать измерительные стенды**, в которых предусмотрены системы охлаждения без их активации;
- **Включать высоковакуумные насосы** без контроля давления ступени предварительного разряжения;
- **Включать высоковольтные источники питания** без нагрузки;
- **Включать источники оптического излучения** без защитного кожуха;
- **Вскрывать измерительные модули и приборы.**

***Организация выполнения курсовых работ или контрольных практических заданий.***

О необходимости выполнения курсовой работы студента информируют на первой лекции и предлагают либо выбрать тему работы из списка, либо заранее самостоятельно обдумать и предложить тему будущей работы.

Подготовка и защита курсовой работы, а также ее оценка в учебной программе каждого направления определяется большой ролью этого вида подготовки специалиста в общей системе учебных программ, нацеленных на фундаментальность и систематичность образования. Для завершения и защиты курсовой работы студенту предоставляется в конце семестра специально одна неделя, свободная от аудиторных занятий. В течение первой установочной недели, отведенной на выбор курсов, утверждается тема и научный руководитель курсовой работы. Темы курсовых работ находятся на портале кафедр. Студент, консультируясь с преподавателями кафедры, за которой закреплено руководство курсовыми работами, определяет тему своей курсовой работы.

Выполнение курсовых работ происходит по следующей схеме:

выбор темы;

поиск литературы и ее изучение;

проведение расчетов, аналитических выводов, экспериментальных

исследований;

написание первого варианта и представление ее научному руководителю;

исправление и доработка текста на основе замечаний руководителя;

представление окончательного текста курсовой работы и ее защита перед учебной комиссией кафедры.

Отчетность (ведомость) по курсовой работе сдается в учебную часть в строго определенные сроки (первая учебная неделя).

Выполнение контрольных практических заданий происходит по аналогичной схеме, единственное отличие - сдача работы происходит курирующему преподавателю.

Ряд исследований при выполнении экспериментальной части работы требуют разработки программного, программно-аппаратного обеспечения или изготовления узлов, устройств или приспособлений для существующих в лаборатории по данному курсу или вновь создаваемых электрофизических стендов.

Разработка программного, программно-аппаратного обеспечения осуществляется в дисплей-классе центра прикладных информационных технологий университета, оснащенного всем необходимым оборудованием и программным обеспечением.

Часть работ (слесарных, электро и радиомонтажных) выполняется студентом самостоятельно в технологической лаборатории кафедры экспериментальной физики, оснащенной соответствующим инструментарием и станками. Узлы, требующие квалифицированного изготовления, могут быть изготовлены в научно-производственных или стеклодувных мастерских университета. В этом случае чертежи, самостоятельно подготовленные студентом, утверждаются преподавателем, и оформляется заказ от кафедры экспериментальной физики согласно установленных в университете правил для их изготовления.

Естественным требованием при выполнении экспериментальной части работы является наличие удостоверения о сдаче в начале учебного года минимума по технике безопасности, строгое выполнение правил ТБ и выполнение требований и правил эксплуатации энергоустановок. Надзор за выполнением указанных требований осуществляется курирующим преподавателем.

В процессе выполнения курсовой работы или контрольного практического задания текущее состояние работы еженедельно обсуждается с преподавателем, курирующим их выполнение.

Обработка результатов практической части работы, и подготовка отчета по курсовому проекту может быть выполнена студентом в дисплей-классе центра прикладных информационных технологий университета, оснащенного практически всеми необходимыми аппаратными и программными ресурсами.

Защита курсовых работы осуществляется перед экспертной учебной комиссией, назначаемой зав. кафедрой на специальном заседании научного семинара кафедры и представляет собой публичное научное сообщение по результатам работы должным образом оформленное с использованием мультимедийных средств. Лучшие работы могут быть рекомендованы в качестве докладов на ежегодную университетскую конференцию.

### ***Инновационная составляющая курса.***

Реализация предлагаемого УМК будет способствовать повышению уровня подготовки бакалавров. Выпускники будут способны самостоятельно применять современные методы физического эксперимента, применять научно обоснованные и проработанные подходы для изучения физических процессов и явлений, осуществлять самостоятельно планирование и постановку физического эксперимента.

Подготовка УМК обусловлена необходимостью изучения студентами бакалавриата как фундаментальных основ изучаемой дисциплины, так и современных подходов и решений применяемых при постановке и проведении физических исследований. Особое внимание в УМК уделено практическому аспекту подготовки, столь необходимой современному специалисту.

Инновационность подачи учебного материала в курсе находится в русле активного внедрения цифровых технологий. С одной стороны курс содержит в себе фундаментальные научно теоретическую и методическую составляющие, подкрепленные наглядным иллюстративным материалом с использованием современных средств мультимедиа и визуализации. С другой стороны – лабораторные и самостоятельные работы предполагают применение новейших образцов современной измерительной техники, а так же управление работой научно-исследовательских установок на базе аппаратных и программных средств последнего поколения.

Освоение курса связано с выполнением самостоятельных научно-практических исследований в форме контрольного практического задания или курсовой работы (по выбору), согласно перечню предложенных актуальных тем, являющихся прологом выполнения дипломной работы.

В реализуемой магистерской программе все УМК построены по единой форме расположения и организации материала, позволяют соотносить их содержание в общем контексте подготовки специалистов. Использование единого подхода к представлению учебно-методической информации дает возможность отобразить, с одной стороны, существующие межпредметные взаимосвязи, а с другой – динамику развития отдельных тем и их сочетание, что особенно актуально при выполнении самостоятельных научных исследований (курсовые и дипломные работы, магистерская диссертация). Задачи лабораторного практикума и предлагаемые темы курсовых работ



позволяют получить практические навыки по разделам изучаемой дисциплины.

Предлагаемая для изучения курса литература в основе своей имеется в наличии в библиотечном фонде РУДН, в противном случае электронные версии доступны в локальной сети на сайте магистерской программы (<http://vlab.sci.pfu.edu.ru>).

Разрабатываемый УМК является плодом совместной работы коллектива авторов, состоящих из преподавателей Вуза и ведущих специалистов крупнейшего научного центра РФ «Курчатовский институт». Такой подход позволяет рассмотреть последние достижения в области физического эксперимента, обеспечить проведение НИРС по самым актуальным и перспективным направлениям, относящимся к приоритетным направлениям развития науки, технологии и техники РФ, на современных электрофизических стендах и установках. Кроме того, применить последние разработки для постановки оригинальных экспериментальных работ лабораторного практикума, включая удаленный доступ.

Авторы курса выделили две основные цели его написания:

1. Разработка разделов, являющихся на сегодняшний день наиболее перспективными.
2. Практическая составляющая курса, нацеленная на изучение и освоение методов и принципов проведения экспериментальных исследований, а также современного лабораторного и измерительного оборудования.

Предлагаемый учебный курс является принципиально инновационным как в области содержания, так и технологии организации педагогического процесса.

#### **Обязательная литература:**

1. *Х.И. Кунце Методы физических измерений Москва.: Мир, 1989. 216 с.*

2. В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин. *Электрорадиоизмерения*. М.: Высшая школа, 1986. 352 с.
3. А.Н. Зайдель *Погрешности измерений физических величин*. Ленинград: Наука, 1985. 112 с.
4. Л.Н. Розанов *Вакуумная техника*. Москва.: Высшая школа, 1990. 320 с.
5. Д.Б. Монтгомери *Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов*. М.: Мир, 1971. 347 с.
6. Г. Кнопфель *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: Мир, 1972. 391 с.
7. В.В. Лебедева *Техника оптической спектроскопии*. Москва.: Изд-во МГУ, 1986. 352 с.
8. Л.С. Горн, Б.И. Хазанов *Современные приборы для измерения ионизирующих излучений*. М.: Энергоатомиздат, 1989. 232 с.

#### **Дополнительная литература:**

- Э Ангерер *Техника физического эксперимента*. Москва: Физмат, 1962. 452 с.
- В.Д. Кукуш. *Электрорадиоизмерения*. М.: Радио и Связь, 1985. 368 с.
- В.В. Андреев, А.А. Балмашнов *Лабораторный практикум «Экспериментальные методы в физике плазмы»*: Учеб. пособие / Москва.: Издательство Российского университета дружбы народов, 1994. 109 с.
- Дж. Уэстон *Техника сверхвысокого вакуума*. Москва.: Мир, 1988. 366 с.
- В.Р. Карасик *Физика и техника сильных магнитных полей*. М.: Наука, 1964. 347 с.
- А.С. Лагутин, В.И.Ожогин *Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте*. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.

- В.В.Панин, Б.М. Степанов Измерение импульсных магнитных и электрических полей. М.: Энергоатомиздат, 1987. 120 с.*
- М.М. Гуревич Фотометрия (теория, методы и приборы). Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.*
- В.А. Григорьев, А.А. Колюбин, В.А. Логинов Электронные методы ядерно-физического эксперимента: Учеб.пособие для вузов/ М.: Энергоатомиздат, 1988. 336 с.*
- Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др.; под общ ред . Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева Вакуумная техника: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 360 с.*

#### **Условия и критерии выставления оценок:**

От студентов требуется посещение лекций и лабораторных (практических) занятий, обязательное выполнение и сдача обязательного количества лабораторных работ (зачет по лабораторному практикуму) и самостоятельной контрольной практической работы или курсовой работы (по выбору), а также **сдача итогового экзамена**. Особо учитывается активная работа при выполнении самостоятельного контрольного практического задания (или курсовой работы), а также ритмичность и качество выполнения обязательных лабораторных работ.

Для успешного выполнения каждой лабораторной работы студент должен внимательно изучить учебно-методические материалы (пособия и литературу, рекомендованную для выполнения лабораторных работ), уметь изложить изученный материал и быть готовым к выполнению. Важным этапом в итоговой аттестации студента является обязательное выполнение и сдача самостоятельного контрольного практического задания (или курсовой работы). Студент не допускается к итоговому экзамену, если он набрал менее 50% баллов. При набранных 60% баллов

студент **может** автоматически получить оценку «3». Более высокая оценка может быть получена только на итоговом экзамене.

**Балльная структура оценки:**

За выполнение обязательных лабораторных работ (7 работ в течение семестра) – 35 баллов. За каждую лабораторную работу – 5 баллов (1 балл – допуск к выполнению работы, 1 балл – выполнение, 3 балла – оформление и сдача работы).

В итоговом подсчете на лабораторные работы – 35 баллов (зачет по лабораторному практикуму).

Самостоятельная контрольная практическая работа – 25 баллов (всего).

Промежуточный контроль (рубежная аттестация) – 10 баллов.

Семестровый итоговый экзамен – 30 баллов.

Всего – 100 баллов за семестр.

При выборе (выполнении) курсовой работы по данному курсу, контрольное практическое задание снимается, максимальный балл за курсовую работу – 25 баллов засчитывается в итоговую сумму баллов.

**Шкала оценок:**

A (5+) -  $93 \leq 100$  баллов;

B (5) -  $84 \leq 92$  баллов;

C (4) -  $74 \leq 83$  баллов;

D (3+) -  $63 \leq 73$  баллов;

E (3) -  $51 \leq 62$  баллов;

FX (2+) -  $31 \leq 50$  баллов;

F (2) -  $0 \leq 30$  баллов.

	Неуд	3	4	5
--	------	---	---	---

кредит	Сумма	<b>F</b>	<b>FX</b>	<b>E</b>	<b>D</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>A</b>
	Баллов	2	2+	3	3+	4	5	5+
2	100	<b>0≤30</b>	<b>31≤50</b>	<b>51≤62</b>	<b>63≤73</b>	<b>74≤83</b>	<b>84≤92</b>	<b>93≤100</b>

### **Пояснение оценок:**

A – выдающийся ответ

B – очень хороший ответ

C – хороший ответ

D – достаточно удовлетворительный ответ

E – отвечает минимальным требованиям удовлетворительного ответа

FX – означает, что студент может добрать баллы только до минимального удовлетворительного ответа

F – неудовлетворительный ответ (либо повтор курса в установленном порядке, либо основание для отчисления).

### **Основные правила проведения экспериментальных исследований в учебных лабораториях**

#### ***Общие положения:***

Экспериментальные исследования (лабораторные и курсовая работы, контрольные практические задания) выполняются студентами согласно установленного в начале семестра расписания. К выполнению работы не допускаются учащиеся, которые:

- не прошли аттестацию по технике безопасности и правил эксплуатации электроустановок;
- грубо нарушают правила внутреннего распорядка в лаборатории;
- не подготовились для выполнения экспериментальных исследований;

#### ***Техника безопасности***

Инструктаж по «Правила технической эксплуатации электроустановок и Правила техники безопасности при их эксплуатации» проводится преподавателем, ведущим занятие, совместно с представителями служб главного инженера университета.

При положительных результатах тестовых заданий получают допуск (выдается службой главного энергетика РУДН) для работы в лаборатории с оборудованием до 1000 В.

*Студент обязан:*

Строго выполнять правила внутреннего распорядка в лаборатории, бережно относиться к оборудованию и приборам лаборатории.

Самостоятельно подготовиться к выполнению экспериментальных исследований, и получить разрешение на их выполнение у курирующего преподавателя с отметкой в лабораторном журнале;

*Студент несет ответственность:*

- за порчу имущества и нанесение материального ущерба лаборатории

*Преподаватель несет ответственность:*

- за поддержание рабочей дисциплины и порядка в лаборатории;

*Преподаватель имеет право:*

- отстранять от проведения работ студентов, нарушающих установленные выше правила;

**Требования к оформлению отчета самостоятельных работ (лабораторных, курсовых работ и контрольных практических заданий)**

***Структура отчета***

Объем отчета по лабораторной работе не должен превышать 8 стр. Объем отчета по курсовой работе не должен превышать 18 стр. Текст набирается на компьютере и печатается на принтере. Требования по содержанию разделов и оформлению отчета изложены ниже.

Отчет (требования к содержанию разделов лабораторного отчета) включает:

- Титульный лист;
- Аннотация;

Представляет собой краткое (несколько предложений) содержание работы, включающее цель работы, объект исследований, используемый метод, диапазон варьируемых параметров эксперимента, основной результат, погрешности измерений.

#### 1. Введение;

Содержит краткое теоретическое рассмотрение изучаемого явления и краткий обзор литературы по изучаемому вопросу;

#### 2. Описание эксперимента

В данном разделе, относящемся к постановке эксперимента, необходимо дать подробное описание используемых методов, последовательности операций, способов и приемов, которые характеризуют технологию эксперимента.

##### 2.1 Методика измерений,

Описывается основная идея эксперимента и дается детальное описание методики измерений, средств измерений и диагностики.

##### 2.2 Описание установки,

Дается подробное описание экспериментальной установки. Особое внимание уделяется тем ее элементам, которые могут влиять на результаты измерений.

##### 2.3 Результаты измерений;

Приводится полный спектр первичных результатов измерений в виде таблиц и/или графиков. Детально описаны условия, при которых они получены.

#### 3. Анализ результатов измерений, включающий:

##### 3.1 Обработка результатов

Описываются используемые алгоритмы обработки результатов измерений.

### 3.2 Оценка погрешностей;

Приводятся погрешности измеряемых величин и результатов измерений. Описываются методики, с помощью которых определялись погрешности.

#### 1. Обсуждение полученных результатов;

Основной акцент дается на главный результат. Указывается область варьируемых параметров эксперимента, в которых полученный результат устойчив. Проводится сравнение полученных результатов с теоретическими выводами, обсуждаются их расхождения, и делается попытка их объяснения.

#### 2. Выводы и заключение;

Отмечается суть выполненной работы, делаются выводы. Приветствуются оригинальные подходы к решению поставленной задачи, критические замечания по улучшению методики проведения эксперимента.

#### 3. Список используемой литературы.

В разделе указывается используемая при выполнении работы основная и дополнительная литература.

### ***Общие положения по оформлению***

Электронная копия отчета и ее бумажный вариант должна быть в MS Word. При оформлении границы полей, шрифты, параметры абзацев, вставки (номера страниц, рисунки, графики и т.п.) задаются с помощью панели инструментов или меню (Файл - Параметры страницы; Формат – Шрифт, Абзац, Регистр; Вставка – Номера страниц, Рисунок).

Титульные листы отчетов лабораторной работы и курсовой представлены в Приложение А. Шрифт - Times New Roman Cyr, размер - 14 пт, регистры – указаны в примере, выравнивание абзацев - по центру.

Разделы и подразделы должны иметь заголовки. Заголовки разделов располагают с левого края строки без точки в конце. Текст раздела



отделяется от текста двумя межстрочными интервалами. Переносы в заголовках не допускаются. Каждый раздел рекомендуется начинать с новой страницы.

Для нумерованных заголовков разделов отчета шрифт - Times New Roman, размер - 12 пт, Bold, выравнивание по левому краю.

Пример:

- Раздел 1,
  - Подраздел 1.1,
    - пункт 1.1.1,  
подпункт 1.1.1.1.

Основной текст - формат А-4 (297x210), ориентация - книжная. Границы полей: верхнее, нижнее – 2 см; левое– 2.5 см, правое -1.5см, шрифт - Times New Roman, размер - 12 пт, интервал - полуторный (Word), автоматический перенос слов в границах полей, выравнивание по ширине. Формулы и символы набираются в редакторе формул Equation. Ссылки в тексте заключены в квадратные скобки.

Нумерация страниц (меню Вставка - Номера страниц). Положение - внизу страницы, выравнивание - по центру, без нумерации первой страницы - титульного листа.

Пример оформления отчета показан в методических рекомендациях.

*Графический материал и таблицы*

Иллюстрации: схемы, чертежи, графики, диаграммы, фотоснимки, рисунки следует располагать по тексту непосредственно после первого упоминания или на следующей странице, если в указанном месте они не помещаются.

Все иллюстрации в тексте должны быть со ссылками. Допустима как сквозная нумерация рисунков, так и нумерация в пределах раздела («согласно рисунка 4» - при сквозной нумерации, либо «согласно рисунка

3.4» при нумерации в пределах раздела). Номер следует размещать под иллюстрацией посередине после слова «Рис.».

Рисунки могут быть выполнены с помощью ЭВМ или от руки. На графиках, выражающих количественные зависимости (экспериментальные, расчетные), должна быть координатная сетка. Стрелки на осях координат в этом случае не ставятся. Цифры располагают ниже оси абсцисс и левее оси ординат. Обозначения физических величин и единиц измерения приводят через запятую с внешней стороны оси по центру или с противоположного относительно начала координат края. Масштаб координатной сетки (линейный, логарифмический масштаб или иной) выбирается из соображений удобства представления результатов. На одном графике допустимо представление семейства функциональных зависимостей. При этом кривые отображаются сглаженными линиями различного типа или цвета, допускается вводить обозначение параметра, при котором получены данные результаты. Экспериментальные точки отмечаются на графике символами.

Результаты измерений и расчетов также целесообразно представлять в виде таблиц. Все таблицы в тексте должны быть с ссылками. Допустима как сквозная нумерация таблиц, так и нумерация в пределах раздела («согласно таблицы 4» - при сквозной нумерации, либо «согласно таблицы 3.4» при нумерации в пределах раздела). Таблицы следует располагать по тексту непосредственно после первого упоминания или на следующей странице, если в указанном месте они не помещаются. Номер таблицы следует размещать в правом верхнем углу после слова “Таблица” над заголовком таблицы. Если в работе одна таблица, её не нумеруют. Слово “Таблица” и заголовок начинаются с прописной буквы, точка в конце заголовка не ставится. Заголовки граф таблицы должны начинаться с прописных букв.

*Математические символы и формулы*

Уравнения и формулы в тексте располагаются в отдельной строке со свободными строками выше и ниже. Если уравнение не умещается в одну строку, оно должно быть перенесено после математических знаков (+, -, x) с их обязательным повторением в новой строке. Пояснение значений, символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно по тексту или под формулой в той же последовательности, как и в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента следует давать с новой строки, первую строку пояснения начинают со слова “где” без двоеточия. Формулы и уравнения в работе следует нумеровать по выбранному способу нумерации сквозному или в пределах раздела.

#### *Написание обозначений единиц физических величин*

При написании числовых значений величин и их обозначений используются согласно системы измерений СИ или СГС. Между последней цифрой числа и обозначением единицы физической величины следует оставлять пробел, исключение составляют знаки, поднятые над строкой. 15 В, 20 А, 12 Вт, 4,3 Дж, 35°, 1 10<sup>-3</sup> Торр, 25%. Не допускается перенос обозначения единиц на следующую строку. Единицы измерений, названные в честь выдающихся ученых, обозначают с большой буквы, например: В (Вольт), Гц (Герц), Па (Паскаль).

Обозначения единиц измерений величин, представимых в виде произведения или частного, следует отделять точкой или косой чертой например: А·м Вт/(м<sup>2</sup> К). Десятичные кратные и дольные единицы представляют в виде: кГц (килогерц), МВт (мегаватт), мВт (милливатт), мкс (микросекунда), мс (миллисекунда).

#### *Список использованных литературных источников*

Список использованных источников составляют в порядке появления ссылок в тексте или в алфавитном порядке. Ссылки следует приводить в форме указания порядкового номера по списку источников, выделенного квадратными скобками, например, [28]. При ссылке на

формулу или рисунок и т.п. из первоисточника следует указывать номера страниц, например [18, с.704]. Допускается приводить ссылки на литературу в подстрочном примечании.

Примеры библиографических описаний:

Монография (учебник, справочник) центрального издательства при числе авторов не более трех:

Б.Б. Кадомцев Коллективные явления в плазме Москва.: Наука, 1988.  
304 с.

Монография (учебник, справочник) центрального издательства при числе авторов больше трех и наличии редактора (редакторов):

Конструирование экранов и СВЧ-устройств / А.М. Чернушенко, Б.В. Петров, Л.Г. Малорацкий и др.; Под. ред. А.М. Чернушенко Москва: Радио и связь, 1990. 351 с.

Отдельный том многотомного издания:

Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика. Молекулярная физика: Учеб. пособие для студентов вузов. 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1982.432 с.

Вузовские учебные пособия:

М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе, П.С. Стрелков Плазменная релятивистская СВЧ-электроника: Учеб. пособие / Москва.: Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002. 543 с.

Периодические издания:

5. R. Benattar, C. Galas, P. Ney X-UV Index of refraction of dense and hot plasmas // Journal of X-ray Science and Technology. 1995. № 5. p.p. 249-260.

1. Взаимодействие электронного пучка с плазмой / И.Ф. Харченко, Я.Б. Файнберг, Р.Н. Николаев и др. // ЖЭТФ 1960. Т. 38, вып. 3. С. 685-692.

Материалы конференций:

7. А.С. Постникова, Б.В. Шишкин Система автоматизации для построения изображения объектов в терагерцовом диапазоне частот //

Образовательные, научные и инженерные приложения в среде Labview и технологии National Instruments: Сборник трудов. междунар. науч.-практ. конф. / Москва. Издательство Российского университета дружбы народов, 2006. С. 259-262.

8. ECR plasmas and ECR Ion Sources / A.Girard, C.Lecot, G.Melin // 27<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. / Budapest, 2000. vol.24B(2000), p.p. 85-88.

### **Академическая этика**

В курсовой работе и контрольных практических заданиях, используемые выдержки, идеи других авторов снабжаются сносками и отражаются в списке используемой литературы. Не допустимо включать в свою работу выдержки из работ без указания на это, пересказывать чужую работу близко к тексту без отсылки к ней, использовать чужие идеи без указания первоисточников, включая электронные версии, распространяемые в Интернет. Все случаи плагиата должны быть исключены. В конце работы, согласно общих требований по оформлению отчетов самостоятельной работы, дается исчерпывающий список всех использованных источников.

### **ТЕМЫ ЛЕКЦИЙ**

7 СЕМЕСТР (сентябрь-январь)

**Неделя 1: Лекция. Общие вопросы измерений.** Классификация измерений. Понятие физической величины. Единицы измерения физических величин и системы единиц. Эталоны.

Литература:

Обязательная:

1. В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин. *Электрорадиоизмерения. М.: Высшая школа, 1986. 352 с*
2. Х.-И. Кунце *Методы физических измерений. М.: Мир, 1989. 213 с.*

Дополнительная:

1. Э. Ангерер *Техника физического эксперимента. Москва: Физмат, 1962. 452 с.*
2. В.Д. Кукуш. *Электрорадиоизмерения. М.: Радио и Связь, 1985. 368 с.*

**Неделя 2: Лекция. Ошибки измерений.** Классификация ошибок измерений. Вероятностные характеристики случайных ошибок. Корреляционный анализ экспериментальных данных.

Литература:

Обязательная:

1. В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин. *Электрорадиоизмерения. М.: Высшая школа, 1986. 352 с.*
2. Х.-И. Кунце *Методы физических измерений. М.: Мир, 1989. 213 с.*

Дополнительная:

1. Е.С. Венцель *Теория вероятностей. Москва: Физмат, 1962. 564 с.*

**Неделя 3: Лекция. Представление экспериментальных данных.** Правила записи результатов эксперимента. Графики и системы координат. Сглаживание экспериментальных кривых. Гистограммы.

Литература:

Обязательная:

1. Х.-И. Кунце *Методы физических измерений*. М.: Мир, 1989. 213 с.

Дополнительная:

Е.С. Венцель *Теория вероятностей*. Москва: Физмат, 1962. 564 с.

**Неделя 4: Лекция. Измерение постоянных и низкочастотных токов и напряжений.** Стрелочные измерительные приборы. Инерционность измерительного прибора. Детекторы амплитудного, средневыпрямленного и среднеквадратичного значений. Цифровые вольтметры. Измерение токов. Измерение мощности. Высокочастотные измерения.

Литература:

Обязательная:

В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин. *Электрорадиоизмерения*. М.: Высшая школа, 1986. 352 с.

*Метрология и радиоизмерения: Учебник для вузов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др. / Под ред. профессора В.И. Нефедова. – М.: Высш.шк., 2003. – 526 с.*

Дополнительная:

1. *Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.: Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.*

2. В.Д. Кукуш. *Электрорадиоизмерения*. М.: Радио и Связь, 1985. 368 с.

**Неделя 5: Лекция. Основные измерительные схемы.** Прямые измерения. Мостовые и компенсационные методы измерений. Энергетическое и анэнергетическое согласование.

Литература:

Обязательная:

*В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин. Электрорадиоизмерения. М.: Высшая школа, 1986. 352 с.*

Дополнительная:

*Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.: Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.*

*В.Д. Кукуш. Электрорадиоизмерения. М.: Радио и Связь, 1985. 368 с.*

**Неделя 6: Лекция. Измерение импеданса.** Понятие импеданса. Распределение токов и напряжений в цепях комплексных сопротивлений. Амплитудно- и фазо-частотные характеристики. Добротность. Q-метр.

Литература:

Обязательная:

- 1. В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин. Электрорадиоизмерения. М.: Высшая школа, 1986. 352 с*
- 2. Поливанов П.М. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными. М.: Энергия, 1972, - 240 с.*

Дополнительная:

- 1. Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.: Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.*
- 2. В.Д. Кукуш. Электрорадиоизмерения. М.: Радио и Связь, 1985. 368 с.*

**Неделя 7: Лекция. Измерения во временной области.** Осциллографирование и представление сигналов во временной области. Методы осциллографических измерений. Электронно-лучевой осциллограф. Цифровой осциллограф.

Литература:



Обязательная:

1. *Власова В.В., Павлов С.Е. Осциллографические методы измерений. Москва. Издательство МАИ. 1990 г.*

Дополнительная:

1. *Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.: Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.*
2. *В.Д. Кукуш. Электрорадиоизмерения. М.: Радио и Связь, 1985. 368 с.*

**Неделя 8: Лекция. Измерения в частотной области.** Прямое преобразование Фурье и спектр сигнала. Принцип действия анализатора спектра. Аналоговые и цифровые спектроанализаторы.

Литература:

Обязательная:

1. *Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш.шк., 2000, -135 с.*

Дополнительная:

1. *В.Д. Кукуш. Электрорадиоизмерения. М.: Радио и Связь, 1985. 368 с.*
2. *В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин. Электрорадиоизмерения. М.: Высшая школа, 1986. 352 с.*

**Неделя 9: Лекция. Измерение импульсных и токов и напряжений.** Особенности измерения широкополосных импульсов. Пиковые детекторы. Бесконтактные индукционные преобразователи тока.

Литература:

Обязательная:

1. В.В.Панин, Б.М. Степанов *Измерение импульсных магнитных и электрических полей.* М.: Энергоатомиздат, 1987. 120 с.

**Неделя 10: Лекция. Магнитометрия.** Методы создания стационарных магнитных полей. Поле проводников с током. Катушки Гельмгольца. Соленоиды с постоянной плотностью тока. Электромагниты. Постоянные магниты. Токовые магнитные конфигурации. Методы и способы измерений магнитостатических полей. Магнитное экранирование.

Литература:

Обязательная:

1. Д.Б. Монтгомери *Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов.* М.: Мир, 1971. 347 с.

Дополнительная:

1. В.Р. Карасик *Физика и техника сильных магнитных полей.* М.: Наука, 1964. 347 с.
2. Э Ангерер *Техника физического эксперимента.* Москва: Физмат, 1962. 452 с.

**Неделя 11: Лекция. Импульсные магнитные поля.** Экспериментальные методы генерации импульсных магнитных полей. Схемы и узлы построения генераторов поля. Электрические, изоляционные, механические и тепловые ограничения различных схем генерации. Скин-эффект и экранирование магнитных полей низкой частоты. Импульсные магнитометрические преобразователи.

Литература:

Обязательная:

1. Г. Кнопфель *Сверхсильные импульсные магнитные поля.* М.: Мир, 1972. 391 с.

Дополнительная:

1. А.С. Лагутин, В.И.Ожогин *Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.*
2. Э Ангерер *Техника физического эксперимента. Москва: Физмат, 1962. 452 с.*

**Неделя 12: Лекция. Молекулярно-кинетическая модель вакуума.** Длина свободного пробега. Распределение молекул по скоростям. Вакуумные условия. Процессы переноса в условиях вакуума. Поток газа. Режимы течения газов в вакуумных системах. Проводимость отверстия, канала. Явления и процессы на границе вакуум-поверхность.

Литература:

Обязательная:

1. Л.Н. Розанов *Вакуумная техника. Москва.: Высшая школа, 1990. 320 с.*

Дополнительная:

1. Дж. Уэстон *Техника сверхвысокого вакуума. Москва.: Мир, 1988. 366 с.*
2. Э Ангерер *Техника физического эксперимента. Москва: Физмат, 1962. 452 с.*
3. Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др.; под общ ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева *Вакуумная техника: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 360 с.*

**Неделя 13: Лекция. Вакуумная техника** Вакуумные материалы. Вакуумные насосы. Методы измерения полного и парциальных давлений. Вакуумные системы, особенности построений. Течеискание.

Литература:

Обязательная:

1. Л.Н. Розанов *Вакуумная техника*. Москва.: Высшая школа, 1990. 320 с.

Дополнительная:

1. Дж. Уэстон *Техника сверхвысокого вакуума*. Москва.: Мир, 1988. 366 с.
2. Э Ангерер *Техника физического эксперимента*. Москва: Физмат, 1962. 452 с.
3. Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др.; под общ ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева *Вакуумная техника: Справочник*. М.: Машиностроение, 1985. 360 с.

**Неделя 14: Лекция. Основы оптического спектрального анализа.** Общие вопросы оптической спектроскопии. Оптические материалы. Спектральный анализ. Рабочий спектральный диапазон прибора. Аппаратная функция. Светосила и относительное отверстие. Дисперсия и разрешающая способность. Типы спектральных приборов. Оптические схемы спектральных приборов.

Литература:

Обязательная:

1. В.В. Лебедева *Техника оптической спектроскопии*. Москва.: Изд-во МГУ, 1986. 352 с.

Дополнительная:

1. М.М. Гуревич *Фотометрия (теория, методы и приборы)*. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.

**Неделя 15: Лекция. Источники оптического излучения.** Черное тело. Источники теплового излучения. Газоразрядные источники излучения. Контур и уширение спектральной линии.

Литература:

Обязательная:

1. В.В. Лебедева *Техника оптической спектроскопии*. Москва.: Изд-во МГУ, 1986. 352 с.

Дополнительная:

1. М.М. Гуревич *Фотометрия (теория, методы и приборы)*. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.

**Неделя 16: Лекция. Приемники оптического излучения.** Основные характеристики приемников излучения. Приемники теплового оптического излучения. Фильтрация оптического излучения. Матричные фотоприемники.

Литература:

Обязательная:

1. В.В. Лебедева *Техника оптической спектроскопии*. Москва.: Изд-во МГУ, 1986. 352 с.

Дополнительная:

1. М.М. Гуревич *Фотометрия (теория, методы и приборы)*. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.

**Неделя 17: Лекция. Ионизирующее излучение. Детекторы.** Основные характеристики ионизирующего излучения в рентгеновском диапазоне длин волн. Источники излучений. Альbedo излучение. Детекторы ионизирующих излучений и их основные характеристики. Полупроводниковые детекторы. Сцинтилляционные детекторы. Ионизационные детекторы.

Литература:

Обязательная:

1. Л.С. Горн, Б.И. Хазанов *Современные приборы для измерения ионизирующих излучений*. М.: Энергоатомиздат, 1989. 232 с.

Дополнительная:

1. В.А. Григорьев, А.А. Колюбин, В.А. Логинов *Электронные методы ядерно-физического эксперимента: Учеб.пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 336 с.*

**Неделя 18: Лекция. Общие вопросы спектрометрии и дозиметрии.**  
Анализ и методы амплитудной и временной селекции. Базовые элементы и узлы регистрирующих систем. Многоканальные анализаторы и радиометры

Литература:

Обязательная:

1. Л.С. Горн, Б.И. Хазанов *Современные приборы для измерения ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 232 с.*

Дополнительная:

1. В.А. Григорьев, А.А. Колюбин, В.А. Логинов *Электронные методы ядерно-физического эксперимента: Учеб.пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 336 с.*

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ:**

### **Электрические измерения:**

**«Мостовые измерения»**

**«Измерение АЧХ и ФЧХ»**

**«Измерения импеданса»**

**«Измерение импульсных сигналов»**

**«Осциллографические измерения»**

**«Спектральный анализ сигналов»**

Аннотация:

На виртуальных моделях и реальных приборах изучаются методы мостовых и компенсационных измерений, методы измерения амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик, классические и современные методы измерения импеданса. Приборы и методы измерения импульсных напряжений. Методы работы с современными осциллографами и спектроанализаторами.

Литература:

Обязательная:

1. В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин. *Электрорадиоизмерения. М.: Высшая школа, 1986. 352 с.*
2. *Метрология и радиоизмерения: Учебник для вузов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др. /Под ред. профессора В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. – 526 с.*
3. Х.-И. Кунце *Методы физических измерений. М.: Мир, 1989. 213 с.*
4. *Поливанов П.М. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными. М.: Энергия, 1972, - 240 с.*
5. *Власова В.В., Павлов С.Е. Осциллографические методы измерений. Москва. Издательство МАИ. 1990 г.*
6. *Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш.шк., 2000, -135 с.*

**Магнитометрия:**

- **«Катушки Гельмгольца»**
- **«Пробочная и остроугольная конфигурация»**
- **«Изучение импульсных магнитных полей и скин-эффекта»**

Аннотация:

Изучаются источники калибровочных магнитостатических полей, токовых магнитных конфигураций. Методы и способы измерений магнитостатических полей. Импульсные магнитные поля. Диффузионные процессы. Методы и способы измерений импульсных магнитных полей.

Литература:

Обязательная:

1. В.В. Андреев, А.А. Балмашинов *Лабораторный практикум «Экспериментальные методы в физике плазмы»: Учеб. пособие / Москва.: Издательство Российского университета дружбы народов, 1994. 109 с.*
2. Х.-И. Кунце *Методы физических измерений. М.: Мир, 1989. 213 с.*
3. Г. Кнопфель *Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 391 с.*
4. Д.Б. Монтгомери *Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971. 347 с.*

**Вакуумная техника:**

- **«Методы измерения вакуума»**
- **«Определение характеристик течения газов в вакуумных системах»**
- **«Определение характеристик высоковакуумной системы»**

Аннотация:

Изучаются принципиальные схемы высоковакуумных систем, вакуумные преобразователи и вакуумметры. Экспериментальное определение характеристик вакуумных систем.

Литература:

Обязательная:

1. В.В. Андреев, А.А. Балмашинов *Лабораторный практикум «Экспериментальные методы в физике плазмы»: Учеб. пособие / Москва.: Издательство Российского университета дружбы*



*народов, 1994. 109 с.*

2. *Л.Н. Розанов Вакуумная техника. Москва.: Высшая школа, 1990. 320 с.*

### **Основы оптического спектрального анализа:**

- **«Калибровка монохроматора и определение его характеристик»**
- **«Определение характеристик эталонного источника излучения»**
- **«Определение характеристик ФЭУ»**

Аннотация:

Калибровка монохроматора по эталонному вольфрамовому источнику излучения. Определение характеристик классического монохроматора. Определение спектральной чувствительности ФЭУ.

Литература:

Обязательная:

1. *В.В. Лебедева Техника оптической спектроскопии. Москва.: Изд-во МГУ, 1986. 352 с.*

### **Спектрометрия и дозиметрия ионизирующих излучений:**

- **«Радиометр»**
- **«Определение характеристик амплитудного спектрометра»**

Аннотация:

Определение квантовой эффективности и спектральной чувствительности сцинтилляционного детектора. Изучение многоканального анализатора импульсов. Радиометрические схемы измерений.

Литература:

Обязательная:

1. *В.В. Андреев, А.А. Балмашнов Лабораторный практикум «Экспериментальные методы в физике плазмы»: Учеб. пособие / Москва.: Издательство Российского университета дружбы*

*народов, 1994. 109 с.*

2. *Л.С. Горн, Б.И. Хазанов Современные приборы для измерения ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 232 с.*

### **Календарный план курса**

	<b>Виды и содержание учебных занятий</b>			
<b>Неде- ля</b>	<b>Лекции</b>	<b>Число часов</b>	<b>Лабораторные занятия</b>	<b>Число часов</b>

1	Общие вопросы измерений.	2	ПТЭ ПТБ	2
2	Ошибки измерений.	2	Лабораторная работа №1	4
3	Представление экспериментальных данных.	2		
4	Измерение постоянных и низкочастотных токов и напряжений.	2	Лабораторная работа №2	4
5	Основные измерительные схемы. Согласование.	2		
6	Измерение импеданса.	2	Лабораторная работа №3	4
7	Измерения во временной области.	2		
8	Измерения в частотной области	2	Промежуточный контроль знаний	2
9	Измерение импульсных и токов и напряжений	2	Лабораторная работа №4	4
10	Магнитометрия.	2		
11	Импульсные магнитные поля.	2	Лабораторная работа №5	4
12	Молекулярно-кинетическая модель вакуума	2		
13	Вакуумная техника	2	Лабораторная работа №6	4
14	Основы оптического спектрального анализа.	2		
15	Источники оптического излучения.	2	Лабораторная работа №7	4
16	Приемники оптического излучения.	2		
17	Ионизирующее излучение. Детекторы	2	Лабораторная работа №8	4
18	Общие вопросы спектрометрии и дозиметрии.	2		
19	Сдача контрольного практического задания (курсовой)			2
20	Итоговый контроль знаний			2

**Примерный перечень тем курсовых работ и контрольных практических заданий.**

***Курсовые работы:***

1. Расчет и испытание системы натекания рабочего газа плазмотрона.

2. Сильноточный генератор импульсного магнитного поля авторезонансного ускорителя.
3. 3-D измерения магнитостатического поля плазменного накопителя.
4. Пояс Роговского для прецизионных измерений импульсных токов.
5. Диагностический стенд оптической спектрометрии плазмы.
6. Разработка систем синхронизации измерений импульсного плазмотрона.
7. Измерения спектрального состава излучения плазмы в радиочастотном диапазоне.
8. Импедансно-частотные характеристики п/п СВЧ структур.

***Контрольные практические задания:***

1. Экспериментальные исследования электромагнитной индукции.
2. Измерение магнитострикции ферромагнетика с помощью тензодатчика.
3. Исследование собственных и вынужденных электрических колебаний в колебательном контуре.
4. Изучение эффекта Холла.
5. Экспериментальные исследования диэлектрических свойств материалов.
6. Изучение магнитных свойств ферромагнетиков

***Использованные литературные источники.***

1. *Межгосударственный стандарт - ГОСТ 7.32-2001 «Отчет о научно-исследовательской работе»*
1. *ГОСТ 8.417-81 "ГСИ. Единицы физических величин".*