

Міністерство світи і науки України  
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
фізико-технічний факультет  
кафедра радіоелектронної автоматики

В.Б.Мазуренко

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ  
Конспект лекцій

Дніпро

2018

Наведено конспект лекцій з курсу «Фізичні основи технічного захисту інформації», який розроблено відповідно до навчального плану підготовки бакалаврів за напрямком підготовки 6.170102 «Системи технічного захисту інформації». Для студентів фізико-технічного факультету ДНУ, що навчаються за напрямком «Системи технічного захисту інформації».

Укладач: старший викладач кафедри радіоелектронної автоматики фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара Мазуренко Валерій Борисович.

## Лекція № 1

**Тема:** Защита информации. Основные термины и определения. Технические каналы утечки информации.

**Оглавление**

Определение информации.....	3
Классификация информации по степени конфиденциальности.....	3
Виды тайн, содержащиеся в защищаемой информации.....	4
Формы представления информации.....	5
Угрозы информации .....	6
Классификация, виды и формы разведки.....	7
Виды разведки.....	7
Формы разведывательной деятельности .....	7
Техническая разведка .....	8
Технические каналы утечки информации.....	13
Термины и определения.....	13
Технические каналы утечки информации, обрабатываемой техническими средствами обработки информации (ТСИ).....	14
Технические каналы утечки информации при передаче ее по каналам связи.....	14
Технические каналы утечки речевой информации .....	15
Технические каналы утечки видовой информации.....	16
Техническая защита информации .....	16
Контрольные вопросы по теме .....	18
Уровень модуля.....	18
Уровень курса.....	20

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ.ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.

2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.

## **Определение информации**

---

**Информация** - сведения о субъектах, объектах, событиях, явлениях и процессах.

Значение информации в жизни современного общества непрерывно возрастает. Все сведения, имеющие важное военно-стратегическое значение для государства, тщательно скрываются и защищаются. В настоящее время информация, относящаяся к технологии производства и сбыта продукции, стала рыночным товаром, имеющим большой спрос на рынке. Информационные технологии постоянно совершенствуются в направлении улучшения способов защиты информации. С другой стороны, развитие новых информационных технологий сопровождается такими негативными явлениями, как промышленный шпионаж, компьютерные преступления и несанкционированный доступ (НСД) к секретной и конфиденциальной информации. Поэтому защита информации является важнейшей государственной задачей в любой стране. Защита информации должна обеспечивать предотвращение ущерба в результате утери (хищения, утраты, искажения, подделки) информации в любом ее виде.

Большинство современных предприятий независимо от вида деятельности и форм собственности не может успешно вести хозяйственную и иную деятельность без обеспечения системы защиты своей информации, включающей организационно-нормативные меры и технические средства контроля безопасности информации при ее обработке, хранении и передаче в автоматизированных системах (АС).

## **Классификация информации по степени конфиденциальности**

---

**Информация с ограниченным доступом** - информация, право доступа к которой ограничено установленными правовыми нормами и (или) правилами.

По степени конфиденциальности (степени ограничения доступа) информация может быть секретной, конфиденциальной или несекретной.

Виды информации, которые подлежат защите:

**Секретная информация** - информация с ограниченным доступом, которая содержит сведения, составляющие государственную или иную предусмотренную законом тайну.

**Конфиденциальная информация** - информация с ограниченным доступом, находящаяся во владении, пользовании или распоряжении отдельных физических или юридических лиц либо государства и порядок доступа к которой устанавливается ими.

В частности, государственная тайна – это вид секретной информации, содержащей защищаемые государством сведения в области военной, внешнеполитической, экономической, разведывательной, контрразведывательной и оперативно-розыскной деятельности, распространение которых может нанести ущерб безопасности государства.

К служебной тайне относятся охраняемые государством сведения в любой области науки, техники, производства и управления, разглашение которых может нанести ущерб интересам государства. Служебная тайна относится к секретной информации и имеет гриф «секретно».

К конфиденциальной информации относят сведения, содержащие коммерческую тайну, адвокатскую и следственную тайну, некоторые виды служебной тайны, врачебную тайну, тайну переписки, телефонных переговоров, почтовых и телеграфных отправок, а также некоторые сведения о частной жизни и деятельности граждан.

Конфиденциальную информацию составляют сведения, порядок доступа к которым определен их собственником в соответствии с законодательством страны и уровнем доступа к информационному ресурсу. Конфиденциальная информация становится доступной только санкционированным лицам, объектам или процессам.

### **Виды тайн, содержащиеся в защищаемой информации**

---

По своему характеру информация может быть политической, военной экономической, научно-технической, производственной или коммерческой.

Государственные секреты включают в себя государственную и служебную тайны. Предпринимательские секреты включают в себя промышленную, финансовую и коммерческую тайны. Перечислим некоторые важные типы тайн.

**Коммерческая тайна** содержит информацию конфиденциального характера из любой сферы производственной и управленческой деятельности государственного или частного предприятия, разглашение которых может нанести материальный или моральный ущерб ее владельцам или пользователям (юридическим лицам). Охрана коммерческой тайны осуществляется владельцем на основе государственных законодательных актов. Коммерческая тайна включает в себя также подробности коммерческой деятельности, состав партнеров, источники сырья, технологию сбыта продукции.

**Промышленная тайна** – это новые технологии, открытия, изобретения, применяемые в процессе производства продукции, и т.д.

**Финансовую тайну** могут составлять бухгалтерские и финансовые документы, деловая переписка и т.д.

**Личная тайна** – это сведения конфиденциального характера, разглашение которых может нанести материальный ущерб отдельному (физическому) лицу. Охрана личной тайны осуществляется ее владельцем. Государство не несет ответственность за сохранность личных тайн.

### **Формы представления информации**

---

Информация по форме представления, способам кодирования и хранения может быть графической, звуковой, текстовой, цифровой (компьютерной), видеoinформацией и т.п. Для хранения как секретной, так и несекретной информации применяются одни и те же носители. В общем случае носители секретной и конфиденциальной информации охраняются ее собственником.

Носители защищаемой информации классифицируются как документы; изделия (предметы); вещества и материалы; электромагнитные, тепловые, радиационные и другие излучения; гидроакустические, сейсмические и другие физические поля, представляющие особые виды материи; сам объект с его видовыми характеристиками и т.п. В качестве носителя защищаемой информации может быть также человек.

Формы представления информации зависят от ее характера и физических носителей, на которых она представлена. Основными формами информации, подлежащими защите, являются:

- документальные;
- акустические;
- телекоммуникационные;
- видовые.

**Документ** – представленная на материальном носителе информация с идентификатором, позволяющим установить характер документа и его собственника. Информация, записанная на носителе, может быть графической и (или) текстовой. На документе - носителе защищаемой информации указывается степень конфиденциальности информации в зависимости от ее важности.

**Источниками речевой информации** являются разговоры в помещениях, системы звукоусиления и звуковоспроизведения. Речевая информация распространяется в газовой, твердотельной и гидравлической средах. Носителем речевой информации являются акустические колебания частиц в

виде звуковых волн различной длины в упругих средах. Слышимый речевой сигнал находится в диапазоне частот 200 Гц – 6 кГц.

*Изделия* (предметы) как носители защищаемой информации могут представлять собой засекреченные образцы военной техники, опытные образцы вновь разрабатываемых высокотехнологичных изделий и систем, определяющих уровень научно-технического развития промышленности страны.

*Материалы и вещества*, применяемые в производстве и эксплуатации новых образцов техники и в военных изделиях. Отметим особо, что иностранные разведки могут получать информацию о материалах и веществах наиболее доступными способами – по отходам производства режимных предприятий, по составу воздушной среды и водных осадков в непосредственной близости от предприятия.

*Электромагнитные излучения* различной частоты могут содержать информативные сигналы от защищаемого объекта при его функционировании. Источником электромагнитного излучения в большинстве случаев являются кабельные и проводные линии каналов передачи информации. Опасными являются также вспомогательные средства и системы, представляющие собой сосредоточенные и распределенные случайные антенны.

*Носителем видовой информации объекта* является сам объект, а также его фото- и видеозображения на материальных носителях информации.

## **Угрозы информации**

---

*Утечка информации* - неконтролируемое распространение информации, которое ведет к ее несанкционированному получению.

*Нарушение целостности информации* - искажение информации, ее разрушение или уничтожение.

*Блокировка информации* - исключение возможности санкционированного доступа к информации.

*Угроза для информации* - утечка, возможность блокирования или нарушения целостности информации.

*Доступ к информации* - возможность получения, обработки информации и (или) нарушения ее целостности.

*Несанкционированный доступ к информации* - действие, при котором нарушаются порядок доступа к информации и установленные правовые нормы.

*Закладное устройство; закладка* - скрытно установленное техническое средство, создающее угрозу для информации.



**Программная закладка** - скрытно внедренная программа, угрожающая информации, содержащейся в компьютере.

**Компьютерный вирус** - самопроизвольно размножающаяся и распространяющаяся программа. Компьютерный вирус может нарушать целостность информации, программное обеспечение и (или) режим работы вычислительной техники.

**Специальное воздействие** - воздействие на технические средства, приводящее к осуществлению угрозы для информации.

**Техническая разведка** - несанкционированное получение информации с помощью технических средств и ее анализ.

## **Классификация, виды и формы разведки.**

---

### **Виды разведки**

По направлениям деятельности виды разведки подразделяется на политическую, экономическую, военную и научно-техническую разведку.

**Политическая разведка** осуществляет деятельность по добыванию сведений внутривнутриполитического и внешнеполитического характера в стране, являющейся объектом разведки, организует действия по подрыву политического строя государства.

**Экономическая разведка** занимается сбором сведений, раскрывающих экономический потенциал определенной страны. К таким сведениям относятся характеристики природных ресурсов, промышленности, транспорта, финансовой системы, торговли и т.п.

**Военная разведка** направлена на сбор сведений о военном потенциале интересующего ее государства, о новейших образцах военной техники. Особое внимание иностранные разведки уделяют добыванию информации о научно-исследовательских центрах, видных ученых и специалистах.

**Научно-техническая разведка** занимается добыванием сведений по новейшим теоретическим и практическим разработкам в области науки и техники.

### **Формы разведывательной деятельности**

Основные формы разведывательной деятельности:

- агентурная разведка;
- легальная разведка;
- техническая разведка;
- аналитическая обработка первичной информации.

**Агентурная разведка** использует для добывания информации и проведения диверсионных акций специально подобранных, завербованных и

профессионально подготовленных агентов. Агентурная разведка также предполагает добывание информации путем проникновения агента-разведчика к источнику информации на доступное расстояние для применения технических средств разведки.

*Легальная разведка* добывает информацию при различных официальных связях и контактах с страной, из легальных источников информации.

*Техническая разведка* предполагает сбор информации с использованием технических разведывательных средств.

*Аналитическая обработка* первичной информации позволяет на основе анализа несистематизированной первичной разведывательной информации с помощью специально разработанных программ обработки пол-чать более объективные разведданные.

### **Техническая разведка**

---

Техническую разведку (ТР) можно классифицировать по нескольким признакам.

Первый признак связан со средой размещения средств добывания информации, в соответствии с которым ТР делится на:

- космическую;
- воздушную;
- морскую;
- наземную.

Второй признак связан с используемой аппаратурой или способами ведения разведки. Согласно этому признаку к ТР относятся следующие виды разведок.

*Оптическая и оптоэлектронная разведки*, обеспечивающие добывание информации путем приема и анализа электромагнитных излучений ультрафиолетового, видимого и ИК-диапазонов от объектов разведки.

*Визуально-оптическая разведка*, сущность которой заключается в добывании информации об объектах с помощью оптических наблюдательных приборов или визуально без использования технических средств. Визуально-оптическое наблюдение – наиболее давний способ наблюдения. Современный состав приборов визуально-оптического наблюдения разнообразен – от специальных телескопов, биноклей, монокуляров, зрительных труб до эндоскопов и различных оптических приборов для скрытного наблюдения и регистрации информации в дневных и ночных условиях при любой погоде.

*Фотографическая разведка*, которая предполагает получение видовой информации с помощью специальных фотокамер, установленных на различных носителях. Фотокамеры, установленные на летательных аппаратах,

должны иметь высокую разрешающую способность. Фотосъемка обладает заметными преимуществами перед другими способами разведки, так как позволяет получать оптические изображения объектов с высоким качеством. Изучение фотоснимков дает наибольшее количество разведывательных сведений по сравнению с визуальным, телевизионным или радиолокационным наблюдением, а также при использовании средств инфракрасной разведки. Поэтому специалисты считают фотографирование одним из самых эффективных способов разведки скрываемых объектов. В зависимости от применяемых фотоматериалов фотографирование в разведывательных целях может быть черно-белым, цветным и спектрзональным. На спектрзональных снимках различимы нарушения растительного покрова, дороги, мосты, искусственные объекты, лиственные и хвойные породы деревьев.

*Инфракрасная разведка (ИКР)* позволяет добывать информацию об объектах при использовании в качестве носителя информации либо собственного теплового излучения объектов, либо отраженного ИК-излучения луны, звездного неба, а также отраженного излучения специальных ИК-прожекторов подсветки объектов. Соответственно этим принципам приборы ИКР делятся на две группы:

- тепловизионные приборы;
- приборы ночного видения (ПНВ).

Тепловизионная аппаратура позволяет получать изображение путем регистрации теплового контраста между объектом и окружающим фоном. Достоинствами тепловизионной аппаратуры являются: скрытность ведения разведки ввиду отсутствия подсвечивающих излучений, относительно высокая помехоустойчивость к излучениям в видимой части спектра, способность выявлять замаскированные цели даже в плохих метеорологических условиях (туман, дым, дождь).

*Радиоэлектронная разведка (РЭР)* позволяет получать информацию путем приема и анализа электромагнитного излучения (ЭМИ) радиодиапазона, создаваемого различными радиоэлектронными средствами.

Радиоэлектронная разведка обладает следующими преимуществами:

- Проводится без непосредственного контакта с объектами разведки.
- Действует на больших расстояниях в пространстве, пределы которых зависят от частот радиоволн.
- Возможна непрерывность работы при любых условиях.
- Получает достоверную информацию, поскольку ее источником являются радиоизлучающие устройства объекта разведки (за исключением случаев дезинформации).

- Получает информацию чаще всего в реальном масштабе времени.
- Обеспечивает в большинстве случаев скрытность. Противник не в состоянии установить факт разведки, если она проводится радиоприемными (неизлучающими) средствами.

Радиоэлектронная разведка подразделяется на виды:

1. Радиоразведка
2. Радиотехническая разведка
3. Радиолокационная разведка
4. Телевизионная разведка

*Радиоразведка* предназначена для анализа различных видов радиосвязи. Объектами радиоразведки являются средства радиосвязи, радиотелеметрии и радионавигации. Основное назначение радиоразведки – обнаружение и перехват открытых и кодированных передач связных радиостанций, пеленгование их сигналов, анализ и обработка добываемой информации для определения ее содержания, локализация местоположения источников излучений.

*Радиотехническая разведка* представляет собой вид радиоэлектронной разведки по обнаружению и распознаванию радиолокационных станций (РЛС), радионавигационных и радиотелекодовых систем на основе методов радиоприема, пеленгования и анализа радиосигнала. Объектами радиотехнической разведки могут быть также электромагнитные излучения различных технических устройств.

Радио- и радиотехническая разведки представляют собой пассивные разновидности радиоэлектронной разведки.

*Радиолокационная разведка* представляет собой активную разновидность РЭР. Применяется для получения видовой информации о местности объектах на ней. Бывает наземной и воздушной.

*Телевизионная разведка* предназначена для передачи на расстояние сигналов движущихся или неподвижных изображений по радиоканалу или по проводам. Некоторые системы телевизионной разведки позволяют кодирование передаваемых сигналов. Дальность передачи сигналов телевизионных систем разведки может достигать несколько десятков километров.

*Лазерная разведка* основана на использовании лазерных сканирующих камер, которые устанавливаются на воздушных носителях и работают в оптическом диапазоне. Поскольку в лазерных системах разведки реализуется строчно-кадровая развертка, то такая система по принципу действия близка к телевизионной. Отраженное фоновой поверхностью и объектами, на ней расположенными, лазерное излучение принимается оптической системой и

направляется на чувствительный элемент. Приемник преобразует отраженное от поверхности излучение в электрический сигнал, который будет промодулирован по амплитуде в зависимости от яркости фрагментов изображения. Изображение регистрируется на фотопленку или может воспроизводиться на экране электронно-лучевой трубки.

**Фотометрическая разведка** используется для обнаружения и распознавания устройств, в которых используются лазерные источники излучения.

**Гидроакустическая разведка** обеспечивает съем информации при помощи гидролокатора путем приема и анализа акустических сигналов, распространяющихся в водной среде от различных объектов.

**Акустическая разведка** обеспечивает получение информации путем приема и анализа акустических сигналов, распространяющихся в различных средах от объектов. В зависимости от физической природы возникновения информационных сигналов, среды распространения акустических колебаний и способов их перехвата, акустические каналы утечки информации можно разделить на воздушные, вибрационные, акустоэлектрические, оптико-электронные и параметрические.

**Воздушные каналы.** В воздушных технических каналах утечки информации средой распространения акустических сигналов является воздух, для их перехвата используются миниатюрные высокочувствительные микрофоны и специальные направленные микрофоны.

**Вибрационные каналы.** В вибрационных (структурных) каналах утечки информации средой распространения акустических сигналов являются конструкции зданий, сооружений (стены, потолки, полы), трубы водоснабжения, отопления, канализации и другие твердые тела. Для перехвата акустических колебаний в этом случае используются контактные микрофоны (стетоскопы).

**Акустоэлектрические каналы.** Акустоэлектрические технические каналы утечки информации возникают за счет преобразований акустических сигналов в электрические различными радиоэлектронными устройствами. Перехват акустических колебаний осуществляется через ВТСС, обладающие «микрофонным эффектом», а также путем «высокочастотного навязывания».

**Гидроакустический канал** образуется в водной среде и позволяет добывать акустическую информацию с использованием гидрофонов (сонаров).

**Оптико-электронный канал.** Оптико-электронный (лазерный) канал утечки информации образуется при облучении лазерным лучом вибрирующих в акустическом поле тонких отражающих поверхностей (стекло, окон, картин,

зеркал и т.д.). Отраженное лазерное излучение (диффузное или зеркальное) модулируется по амплитуде и фазе (по закону вибрации поверхности и принимается приемником оптического излучения, при демодуляции которого выделяется речевая информация.

*Параметрические каналы.* В результате воздействия акустического поля меняется давление на все элементы высокочастотных генераторов ТСПИ и ВТСС. При этом незначительно изменяется взаимное расположение элементов схем, проводов в катушках индуктивности, дросселей и т.п., что может привести к изменениям параметров высокочастотного сигнала, например, к модуляции его информационным сигналом.

По способу применения технические средства съема акустической информации можно классифицировать следующим образом.

Средства, устанавливаемые заходными (требующими проникновения на объект) методами:

- радиозакладки;
- закладки с передачей акустической информации в инфракрасном диапазоне;
- закладки с передачей информации по сети 220 В;
- закладки с передачей акустической информации по телефонной линии;
- диктофоны;
- проводные микрофоны;
- «телефонное ухо».

Средства, устанавливаемые беззаходными методами:

- аппаратура, использующая микрофонный эффект;
- высокочастотное навязывание;
- стетоскопы;
- лазерные микрофоны.

*Химическая разведка* позволяет получить информацию путем анализа изменений химического состава окружающей среды под воздействием выбросов и отходов промышленного производства, взрывов, а также химического заражения местности.

*Сейсмическая разведка* обнаруживает и анализирует деформационные сдвиговые поля, возникающие в земной коре при различных взрывах.

*Магнитометрическая разведка* проводится путем обнаружения и анализа локальных изменений магнитного поля Земли, вызванным сосредоточением военной техники, подводными лодками и т.п.

## Технические каналы утечки информации

### Термины и определения

**Носитель информации** - материальный объект, содержащий информацию, подлежащую защите от угроз.

**Информативный сигнал** - физические поля и (или) химические вещества, содержащие информацию с ограниченным доступом.

**Технический канал утечки информации** - совокупность носителей информации, среды их распространения и средств технической разведки.

**Непреднамеренный (технический) канал утечки информации** - технический канал утечки информации, в котором носители информации и (или) среда их распространения формируются самопроизвольно)

**Искусственный канал утечки информации** - преднамеренный (технический) канал утечки информации.

**Побочное электромагнитное излучение и наводка** - электромагнитное излучение и наводка, которые являются побочным результатом функционирования технических средств и могут быть носителями информации)

Таким образом, под техническим каналом утечки информации (ТКУИ) понимают совокупность носителя информации (объекта разведки), средства технической разведки (СТР) и физической среды, в которой распространяется информационный сигнал (рис. 1). В сущности, под ТКУИ понимают способ получения с помощью СТР разведывательной информации об объекте.



Рис. 1 Технический канал утечки информации

В зависимости от физической природы сигналы распространяются в определенных физических средах. Средой распространения могут быть газовые (воздушные), жидкостные (водные) и твердые среды. К таким средам относятся воздушное пространство, конструкции зданий, соединительные линии и токопроводящие элементы, грунт и т.п.

Классификация каналов утечки информации представлена на рис. 2. Особенности технических каналов утечки информации определяются

физической природой информационных сигналов и характеристиками среды распространения сигналов утекаемой информации. Ниже приведены некоторые особенности технических каналов утечки информации.

***Технические каналы утечки информации, обрабатываемой техническими средствами обработки информации (ТСИ).***

1. Электромагнитные:

- электромагнитные излучения элементов ТСИ;
- электромагнитные излучения на частотах работы ВЧ-генераторов ТСИ;
- излучения на частотах самовозбуждения усилителей низкой частоты.

2. Электрические:

- наводки электромагнитных излучений элементов ТСИ на посторонние проводники;
- просачивание информационных сигналов в линии электропитания;
- просачивание информационных сигналов в цепи заземления;
- съём информации с использованием закладных устройств.

3. Параметрические:

- перехват информации путем «высокочастотного облучения» ТСИ.

4. Вибрационные:

- соответствие между распечатываемым символом и его акустическим образом.

***Технические каналы утечки информации при передаче ее по каналам связи***

1. Электромагнитные каналы:

- электромагнитные излучения передатчиков связи, модулированные информационным сигналом (прослушивание радиотелефонов, сотовых телефонов, радиорелейных линий связи).



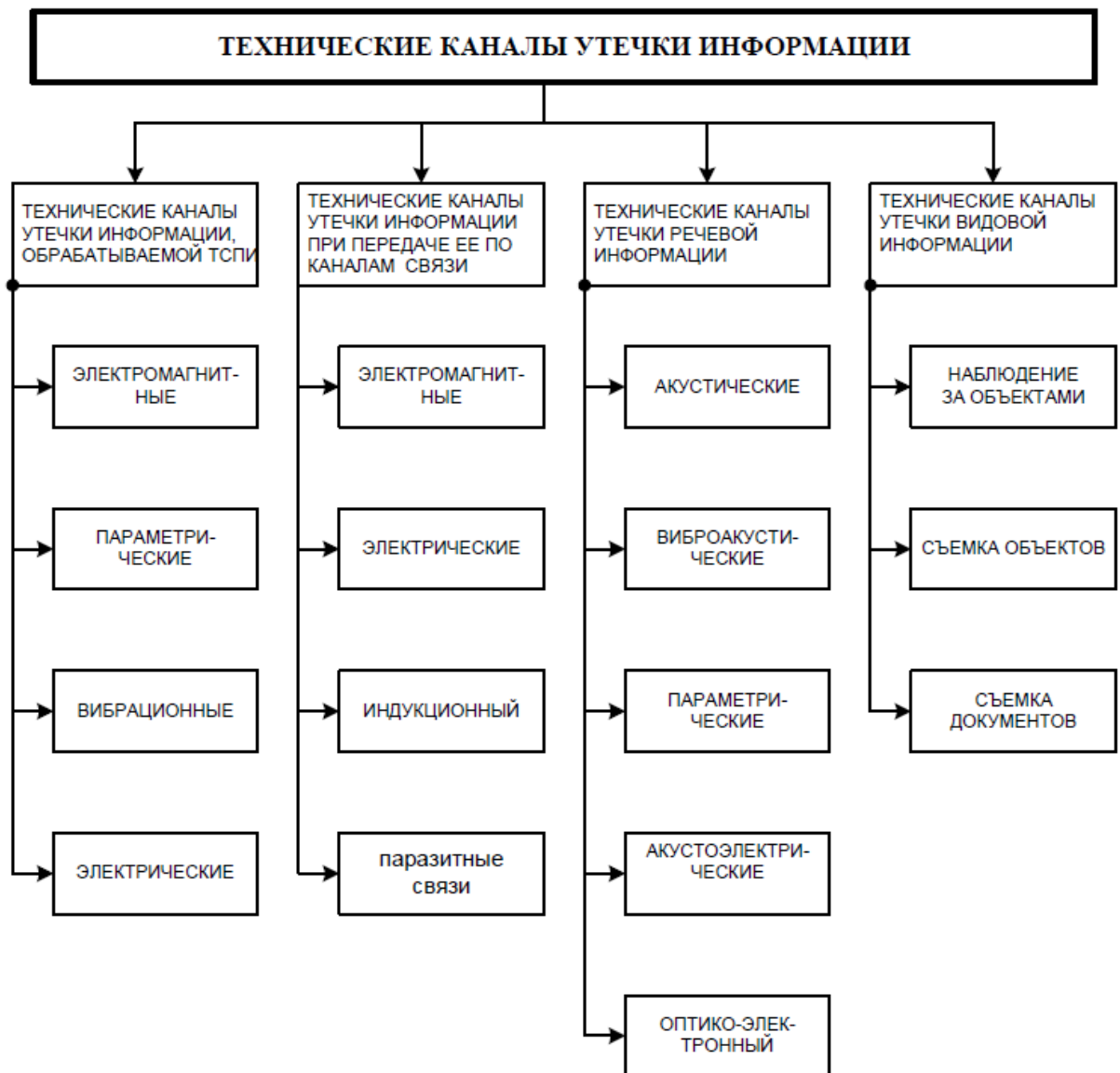


Рис. 2. Технические каналы утечки информации

## 2. Электрические каналы:

- подключение к линиям связи.

## 3. Индукционный канал:

- эффект возникновения вокруг высокочастотного кабеля электромагнитного поля при прохождении информационных сигналов.

## 4. Паразитные связи:

- паразитные емкостные, индуктивные и резистивные связи и наводки близко расположенных друг от друга линий передачи информации.

**Технические каналы утечки речевой информации**

## 1. Акустические каналы:

- среда распространения – воздух.
- 2. Виброакустические каналы:
  - среда распространения – ограждающие строительные конструкции.
- 3. Параметрические каналы:
  - результат воздействия акустического поля на элементы схем, что приводит к модуляции высокочастотного сигнала информационным.
- 4. Акустоэлектрические каналы:
  - преобразование акустических сигналов в электрические.
- 5. Оптико-электронный (лазерный) канал:
  - облучение лазерным лучом вибрирующих поверхностей.

### ***Технические каналы утечки видовой информации***

#### 1. Наблюдение за объектами.

Для наблюдения днем применяются оптические приборы и телевизионные камеры. Для наблюдения ночью – приборы ночного видения, тепловизоры, телевизионные камеры.

#### 2. Съёмка объектов.

Для съёмки объектов используются телевизионные и фотографические средства. Для съёмки объектов днем с близкого расстояния применяются портативные камуфлированные фотоаппараты и телекамеры, совмещенные с устройствами видеозаписи.

#### 3. Съёмка документов.

Съёмка документов осуществляется с использованием портативных фотоаппаратов.

### **Техническая защита информации**

---

***Техническая защита информации*** - деятельность, направленная на предотвращение утечки информации по техническим каналам, ее блокирования и (или) нарушения целостности.

***Техническое средство с защитой; защищенное (техническое) средство; защищенная техника*** - техническое средство, в котором функция защиты информации от угроз является дополнительной к основной.

***Средство технической защиты информации*** - устройство и (или) программное средство, в которых функция защиты информации является основной

***Соккрытие информации*** - способ технической защиты информации, состоящий в исключении или существенном затруднении несанкционированного доступа к информации.

***Пассивное сокрытие информации*** - сокрытие информации путем ослабления энергетических характеристик физических полей или снижения концентрации веществ.

***Активное сокрытие информации*** - сокрытие информации путем формирования таких физических полей и веществ, которые затрудняют получение информации или создают неопределенность ее содержания.

***Система технической защиты информации*** - совокупность организационных структур, нормативно-правовых документов и материально-технической базы. Примечание. Основными элементами материально-технической базы системы ТЗИ являются технические средства с защитой, средства технической защиты информации и средства контроля за эффективностью технической защиты информации.

***Зона безопасности информации*** - пространство, в пределах которого обеспечена безопасность информации.

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Дайте определение понятию информация.
2. Какие явления сопровождают развитие новых информационных технологий?
3. Насколько важно для современных предприятий обеспечение защиты своей информации?
4. Что такое информация с ограниченным доступом?
5. Какие виды информации подлежат защите?
6. Что такое секретная информация?
7. Что такое конфиденциальная информация?
8. Необходимо ли защищать несекретную информацию?
9. Государственная тайна - это секретная или конфиденциальная информация?
10. Какие виды деятельности государства может охватывать государственная тайна?
11. Какие сведения может содержать конфиденциальная информация?
12. В чем основное отличие секретной и конфиденциальной информации?
13. Кто обеспечивает защиту конфиденциальной информации?
14. Что можно называть коммерческой тайной?
15. Какая информация может быть отнесена к промышленной тайне?
16. Какая информация может составлять финансовую тайну?
17. Кто обеспечивает сохранение личной тайны?
18. В какой форме может быть представлена информация?
19. Что может служить носителем информации?
20. Какие основные формы секретной и конфиденциальной информации подлежат защите?
21. Дайте определение понятию документ.
22. Что является источником речевой информации?
23. В каких средах может распространяться речевая информация?
24. Какие изделия могут рассматриваться в качестве носителей защищаемой информации?
25. Какие материалы и вещества могут являться носителем защищаемой информации?
26. Что является носителем видовой информации?
27. Что называют утечкой информации?
28. Что понимается под нарушением целостности информации?

29. Чем отличаются блокировка информации от несанкционированного доступа к информации?
30. Как называется скрытно установленное техническое средство, создающее угрозу для информации?
31. Что называют технической разведкой?
32. Какие виды разведки Вам известны?
33. Чем отличается военная разведка от научно-технической?
34. Какие формы разведывательной деятельности Вам известны?
35. Как связаны агентурная и техническая разведки?
36. Каким образом классифицируется техническая разведка в зависимости от среды размещения средств добывания информации?
37. Что такое оптическая и оптоэлектронная разведки?
38. Как и при помощи каких средств производится визуально-оптическая разведка?
39. Какими средствами производится фотографическая разведка?
40. В чем преимущества фотосъемки?
41. Какие источники излучения используются при проведении инфракрасной разведки?
42. Какими преимуществами обладает радиоэлектронная разведка?
43. Какие виды радиоэлектронной разведки Вам известны?
44. В чем назначение радиоразведки?
45. Для чего предназначена радиотехническая разведка?
46. Для каких целей применяется радиолокационная разведка?
47. Каковы задачи телевизионной разведки?
48. На чем основано действие лазерной разведки?
49. Для чего служит фотометрическая разведка?
50. Какие сигналы используются при проведении гидроакустической разведки?
51. Что такое акустическая разведка?
52. Какие каналы используются при проведении акустической разведки?
53. Что такое оптико-электронный канал акустической разведки?
54. Что служит параметрическим каналом акустической разведки?
55. Какие средства акустической разведки устанавливаются с проникновением на объект?
56. Какие средства используют для проведения акустической разведки без проникновения на объект?
57. Для чего служит химическая разведка?
58. Что обнаруживает сейсмическая разведка?
59. Каковы задачи магнитометрической разведки?

60. Что называется носителем информации?
61. Что служит информационным сигналом?
62. Дайте определение понятию "технический канал утечки информации".
63. Чем различаются непреднамеренный и искусственный канал утечки информации?
64. Какие каналы можно отнести к техническим каналам утечки информации, обрабатываемой техническими средствами обработки информации?
65. Что представляют собой технические каналы утечки информации при передаче ее по каналам связи?
66. Какие каналы утечки речевой информации Вам известны?
67. Какие Технические каналы утечки видовой информации Вам известны?
68. Что обозначает термин "Техническая защита информации"?
69. Чем отличается средство технической защиты от технического средства с защитой?
70. Какой способ технической защиты информации называют сокрытием информации?
71. Каким путем выполняется пассивное сокрытие информации?
72. Как производится активное сокрытие информации?
73. Что называют "зоной безопасности информации"?

### ***Уровень курса***

1. Определение информации. Классификация информации по степени конфиденциальности. Виды тайн, содержащиеся в защищаемой информации.
2. Формы представления и угрозы информации.
3. Техническая разведка и ее виды.
4. Технические каналы утечки информации.
5. Техническая защита информации. Термины и определения.

## Лекція № 2

**Тема:** Основные характеристики и уравнения электрического поля. Закон Кулона, электрическое поле, напряженность поля. Теорема Гаусса.

**Оглавление**

Электрическое поле .....	2
Взаимодействие зарядов. Закон Кулона .....	3
Напряженность поля .....	4
Суперпозиция полей .....	5
Линии напряженности .....	6
Поток вектора напряженности .....	7
Теорема Гаусса .....	10
Контрольные вопросы по теме .....	12
Уровень модуля .....	12
Уровень курса .....	14

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.

## Электрическое поле

---

Имеется два вида электрических зарядов, условно называемых положительным и отрицательным. Заряды одного знака отталкиваются, разных знаков — притягивают друг друга.

Электрический заряд является неотъемлемым свойством некоторых элементарных частиц. Заряд всех элементарных частиц (если он не равен нулю) одинаков по абсолютной величине. Его можно назвать элементарным зарядом. Обозначать его мы будем буквой  $e$ . К числу элементарных частиц принадлежат, например, электрон (несущий отрицательный заряд), протон (несущий положительный заряд) и нейтрон (заряд которого равен нулю). Обычно частицы, несущие заряды разных знаков, присутствуют в равных количествах и распределены в теле с одинаковой плотностью. В этом случае алгебраическая сумма зарядов в любом элементарном объеме тела равна нулю, и каждый такой объем (и тело в целом) будет нейтральным. Если каким-либо образом (например, натиранием) создать в теле избыток частиц одного знака (соответственно недостаток частиц другого знака), тело окажется заряженным. Можно также, не изменяя общего количества положительных и отрицательных частиц, вызвать их перераспределение в теле таким образом, что в одной части тела возникнет избыток зарядов одного знака, в другой — противоположного. Это можно осуществить, приблизив к металлическому телу другое заряженное тело.

Поскольку всякий заряд образуется совокупностью элементарных зарядов, он является целым кратным  $e$ :

$$q = \pm Ne \quad (2.1)$$

Однако элементарный заряд настолько мал, что возможную величину макроскопических зарядов можно считать изменяющейся непрерывно. Электрические заряды могут исчезать и возникать вновь. Однако всегда возникают или исчезают одновременно два элементарных заряда противоположных знаков. Поэтому суммарный заряд электрически изолированной системы не может изменяться. Это утверждение носит название закона сохранения электрического заряда.

Единицей заряда в международной системе единиц является кулон (Кл). Элементарный заряд составляет  $e \approx 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Если заряженные частицы, например, электроны, могут более или менее свободно перемещаться в пределах тела, то соответствующее вещество способно проводить электрический ток. Единицей силы тока является ампер (А). Если сила тока через некоторое сечение составляет 1 А, то за 1 секунду через это сечение пройдет электрический заряд в 1 кулон.



В соответствии со способностью проводить электрический ток все вещества подразделяются на диэлектрики (или изоляторы), проводники и полупроводники. Идеальных изоляторов в природе не существует. Все вещества хотя бы в ничтожной степени проводят электрический ток. Однако вещества, называемые диэлектриками, проводят ток в  $10^{15}$ – $10^{20}$  раз хуже, чем вещества, называемые проводниками. Полупроводниками называется обширная группа веществ, которые по способности проводить ток заполняют промежуточную область между проводниками и диэлектриками.

### **Взаимодействие зарядов. Закон Кулона**

Наличие у тела электрического заряда проявляется в том, что такое тело взаимодействует с другими заряженными телами. Тела, несущие заряды одинакового знака (или, как говорят, заряженные одноименно), отталкивают друг друга. Тела, заряженные разноименно, притягиваются друг к другу. Закон, которому подчиняется сила взаимодействия так называемых точечных зарядов, был установлен в 1785 г. Кулоном:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.2)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности,  $q_1$  и  $q_2$  — величины взаимодействующих зарядов,  $r$  — расстояние между ними.

В международной системе единиц  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная (используются также названия: "диэлектрическая постоянная", "электрическая проницаемость вакуума", "диэлектрическая проницаемость вакуума"). Исследования показали, что  $\epsilon_0$  — величина постоянная и ее значение, измеряемое в фарадах на метр, составляет.

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \quad (2.3)$$

Таким образом, в системе СИ закон Кулона записывается следующим образом

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.4)$$

В случае одноименных зарядов сила, вычисленная по формуле (2.4), оказывается положительной (что соответствует отталкиванию между зарядами). В случае разноименных зарядов сила отрицательна (что соответствует притяжению зарядов друг к другу). Сила взаимодействия двух точечных зарядов величиной 1 кулон каждый, находящихся на расстоянии в 1 метр друг от друга составляет около миллиона тонн.

Зная закон, взаємодія між точечними зарядами, можна вирахувати силу взаємодія між зарядами, зосередженими на тілах кінцевих розмірів. Для цього потрібно розбити кожен із зарядів на стільки малих зарядів, щоб їх можна було вважати точечними, вирахувати по формулі (2.4) силу взаємодія між зарядами, взятими попарно, і потім виконати векторне додавання цих сил. Математично ця операція повністю виконується шляхом інтегрування по об'єму.

### Напряженість поля

Взаємодія між зарядами здійснюється через електричне поле. Будь-який заряд змінює властивості оточуючого його простору — створює в ньому електричне поле. Це поле проявляє себе в тому, що поміщений в яку-небудь його точку електричний заряд опиняється під дією сили. Отже, для того щоб з'ясувати, чи є в даному місці електричне поле, потрібно помістити туди заряджене тіло (для краткості говорять просто: "заряд") і встановити, чи відчуває воно дію електричної сили чи ні. По величині сили, діючої на даний «пробний» заряд, можна судити про «інтенсивність» поля.

Якщо деякий пробний точечний заряд  $q_{пр}$  помістити в поле, створюване точечним зарядом  $q$ , то згідно з законом Кулона на нього буде діяти сила величиною:

$$F = q_{пр} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \right) \quad (2.5)$$

З урахуванням не тільки величини, але й напрямку дії сили (рис.2.1), в векторній формі можна записати:

$$\vec{F} = q_{пр} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \right) \vec{R} \quad (2.6)$$

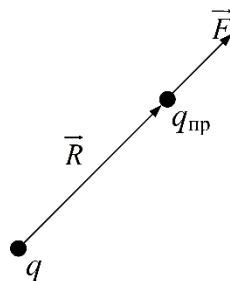


Рис. 2.1 Вектори відстані та сили

З формули (2.6) випливає, що сила, діюча на пробний заряд, залежить не тільки від величин, що визначають поле (від  $q$  і  $\vec{R}$ ), але й від величини

пробного заряда  $q_{пр}$ . Если брать разные по величине пробные заряды, то и силы, которые они испытывают в данной точке поля, будут различны. Однако, отношение  $\frac{F}{q_{пр}}$  для всех пробных зарядов будет одно и то же, и оно зависит только от величин  $q$  и  $r$ , определяющих поле в данной точке. Это отношение и есть та величина, которая характеризует электрическое поле:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}} \quad (2.7)$$

Векторную величину (2.7) называют *напряженностью* электрического поля в данной точке. В соответствии с формулой (2.7) напряженность электрического поля численно равна силе, действующей на единичный точечный заряд, находящийся в данной точке поля. Направление вектора  $\vec{E}$  совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

Как следует из формул (2.6) и (2.7), напряженность поля точечного заряда пропорциональна величине заряда  $q$  и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  от заряда до данной точки поля:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (2.8)$$

В векторном виде

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{R}}{r} \quad (2.9)$$

Направлен вектор  $\vec{E}$  вдоль радиальной прямой, проходящей через заряд и данную точку поля, от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен.

### Суперпозиция полей

Опыт показывает, что сила, с которой система зарядов действует на некоторый не входящий в систему заряд, равна векторной сумме сил, с которыми действует на данный заряд каждый из зарядов системы в отдельности. Отсюда вытекает, что напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum \vec{E}_i \quad (2.10)$$

Последнее утверждение носит название принципа суперпозиции (наложения) электрических полей.

Принцип суперпозиции позволяет вычислить напряженность поля любой системы зарядов. Разбивая протяженные заряды на достаточно малые доли  $dq$ , любую систему зарядов можно свести к совокупности точечных зарядов. Вклад каждого из таких зарядов в результирующее поле вычисляется по формуле (2.9).

### Линии напряженности

Электрическое поле можно задать, указав для каждой точки величину и направление вектора  $E$ . Совокупность этих векторов образует поле вектора напряженности электрического поля. Линии напряженности проводятся таким образом, чтобы касательная к ним в каждой точке совпадала с направлением вектора  $\vec{E}$ . Густота линий выбирается так, чтобы количество линий, пронизывающих единицу поверхности перпендикулярной к линиям, было равно численному значению вектора  $\vec{E}$ . Тогда по картине линий напряженности можно судить о направлении и величине вектора  $\vec{E}$  в разных точках пространства (рис. 2.2).

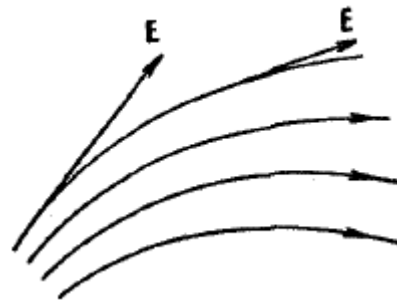


Рис. 2.2 Линии напряженности электрического поля

Линии  $\vec{E}$  одиночного, изолированного точечного заряда представляют собой совокупность радиальных прямых, направленных от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен (рис. 2.3). Линии одним концом опираются на заряд, другим уходят в бесконечность. Линии нигде, кроме заряда, не начинаются и не заканчиваются; они, начавшись на заряде, уходят в бесконечность (заряд положителен), либо, приходя из бесконечности, заканчиваются на заряде (заряд отрицателен). Это свойство линий  $E$  является общим для всех электростатических полей, т. е. полей, создаваемых любой системой неподвижных зарядов: линии напряженности могут начинаться или заканчиваться лишь на зарядах либо уходить в бесконечность.

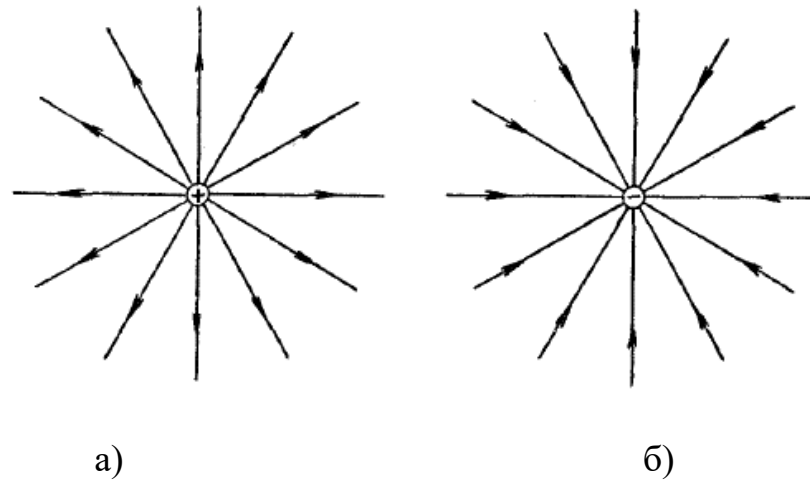


Рис. 2.3 Поле одиночного заряда: а) - положительного, б) - отрицательного

Ниже, на рис. 2.4, показана картина линий  $\vec{E}$  поля *диполя* - совокупности близко расположенной пары одинаковых по величине, но разных по знаку точечных зарядов.

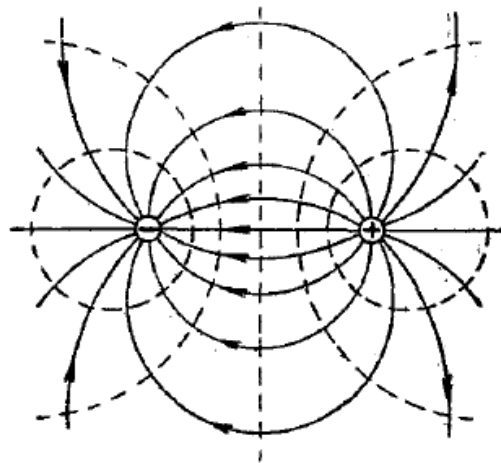


Рис. 2.4 Поле диполя

### Поток вектора напряженности

Введем понятие потока вектора напряженности электрического поля. Поток вектора напряженности электрического поля - это есть число линий напряженности  $\vec{E}$ , пронизывающих некоторую поверхность  $S$ .

Если поверхность представляет собой плоскую площадку, а величина напряженности поля в пределах площадки одинакова, и при этом вектор напряженности перпендикулярен поверхности, то тогда поток определяется как произведение величины вектора напряженности  $E$  на площадь поверхности площадки  $S$ :

$$\Phi = ES \quad (2.11)$$

Однако, если при этом условие перпендикулярности не соблюдается, то в формулу добавляется  $\cos \alpha$ , где  $\alpha$  - угол между вектором  $\vec{E}$  и нормалью к поверхности площадки  $\vec{n}$  (рис. 2.5):

$$\Phi = ES \cos \alpha \quad (2.12)$$

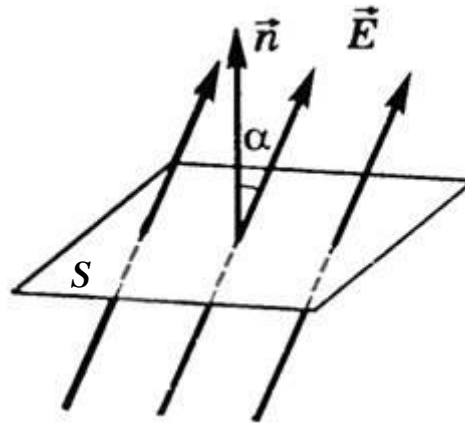


Рис. 2.5 Поток вектора через плоскую поверхность

Формула (2.12), по существу, выражает скалярное произведение векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{S}$ , где  $\vec{S}$  – вектор, перпендикулярный рассматриваемой плоской поверхности (по нормали к поверхности  $\vec{n}$ ), величина которого равна площади этой поверхности  $S$ .

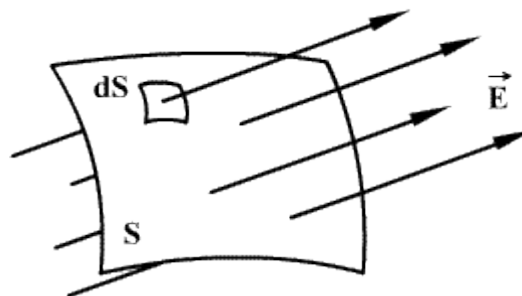


Рис. 2.6 Разбиение поверхности на элементарные участки  $dS$

Рассмотрим поверхность произвольной формы и поток вектора напряженности через такую поверхность. Для того, чтобы вычислить поток вектора через такую поверхность, всю эту поверхность разбивают на бесконечное число бесконечно малых участков  $dS$  (рис. 2.6) и каждому из этих участков приписывают так называемый векторный элемент поверхности  $\vec{dS}$ . Под векторным элементом поверхности в некоторой точке, лежащей на этой поверхности, понимают вектор, направленный перпендикулярно данной поверхности в указанной точке (по нормали); величина этого вектора соответствует бесконечно малой площади, на которую он опирается (фактически, площади точки). Элементарный вектор поверхности обычно

обозначают как  $\vec{dS}$ . Поток вектора через элементарную, бесконечно малую, площадь поверхности представляет собой скалярное произведение двух векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{dS}$ . Тогда полный поток вектора через всю поверхность произвольной формы получаем путем вычисления поверхностного интеграла, рассчитываемого по всей поверхности  $S$ .

$$\Phi = \iint_S \vec{E} \vec{dS} \quad (2.13)$$

Понятие потока вектора напряженности поля играет большую роль в учении об электричестве и магнетизме.

Заметим, что поток (2.13) есть алгебраическая величина, причем знак его зависит от выбора направления нормали к элементарным площадкам, на которые разбивается поверхность  $S$  при вычислении  $\Phi$ . Изменение направления нормали на противоположное изменяет знак у потока  $\Phi$ .

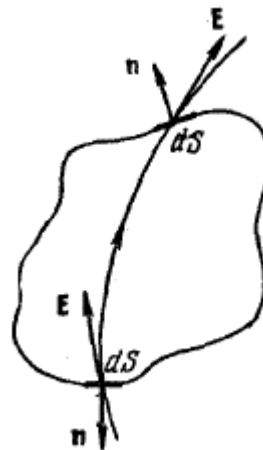


Рис. 2.7 Знак произведения вектора напряженности и нормали к поверхности

В случае замкнутых поверхностей принято вычислять поток, выходящий из охватываемой поверхностью области наружу. Соответственно под нормалью к  $dS$  всегда подразумевается обращенная наружу, т. е. внешняя, нормаль. Поэтому в тех местах, где вектор  $\vec{E}$  направлен наружу (т. е. линия  $\vec{E}$  выходит из объема, охватываемого поверхностью), произведение  $\vec{E} \vec{dS}$  будет положительно; в тех же местах, где вектор  $\vec{E}$  направлен внутрь (т. е. линия  $\vec{E}$  входит в объем, охватываемый поверхностью), произведение  $\vec{E} \vec{dS}$  будет отрицательным (рис. 2.7).

## Теорема Гаусса

Эта теорема может быть сформулирована следующим образом: поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов (рис. 2.8), деленной на  $\varepsilon_0$ :

$$\iint_s \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum q_i \quad (2.14)$$

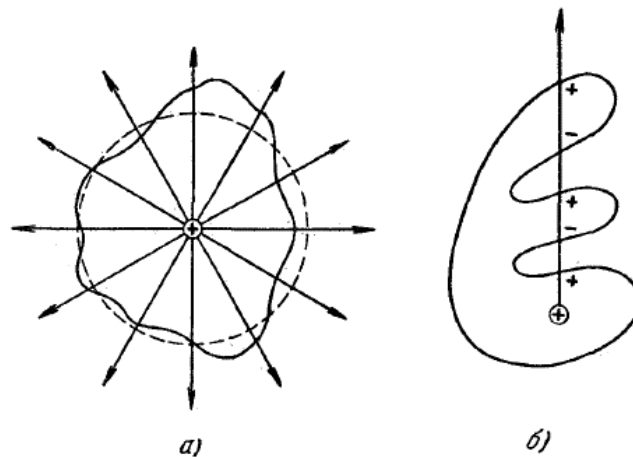


Рис. 2.8 Замкнутая поверхность с заключенными внутри поверхности зарядами

В частности, если внутри поверхности заряды отсутствуют, поток равен нулю. В этом случае каждая линия напряженности поля (создаваемого зарядами, расположенными вне поверхности) пересекает поверхность четное число раз, выходя наружу столько же раз, сколько и входя внутрь (рис. 2.9). В итоге вклад, вносимый в поток каждой из линий, будет равен нулю.

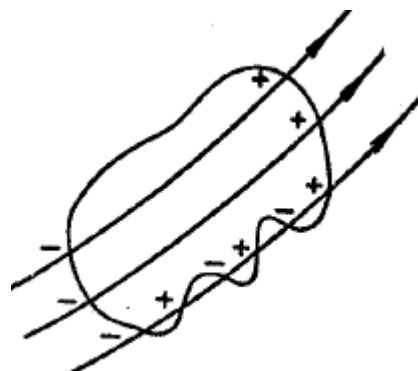


Рис. 2.9 Замкнутая поверхность, не содержащая внутри себя зарядов

Если заряд распределен внутри замкнутой поверхности непрерывно с объемной плотностью  $\rho$ , теорема Гаусса должна быть записана следующим образом:



$$\iint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum \iiint_V \rho dV \quad (2.15)$$

где интеграл справа берется по объему  $V$ , охватываемому поверхностью  $S$ .

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Какая элементарная частица несет отрицательный заряд?
2. Какая элементарная частица несет положительный заряд?
3. Какие известные Вам элементарные частицы не несут электрического заряда?
4. Почему физические тела в большинстве случаев электрически нейтральны?
5. Величина заряда физического тела может принимать любое значение?
6. Почему на практике мы не замечаем ступенчатость изменения электрического заряда?
7. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
8. В каких единицах измеряется электрический заряд?
9. В каких единицах измеряется сила тока?
10. Какова связь между единицами измерения заряда и тока?
11. Как разделяются вещества по их способности проводить электрический ток?
12. Какой фактор определяет способность твердого вещества быть проводником электрического тока?
13. Какой факт установил Кулон своими исследованиями?
14. Запишите формулу закона Кулона в международной системе единиц.
15. Какие термины могут применяться для указания на электрическую постоянную?
16. Если величина одного из двух зарядов увеличится в четыре раза при сохранении расстояния между ними, как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
17. Если величина каждого из двух зарядов уменьшится в три раза при сохранении расстояния между ними, как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
18. Если расстояние между зарядами увеличится в два раза при сохранении величины обоих зарядов, то как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
19. Если изменится полярность обоих зарядов при сохранении величины обоих зарядов и расстояния между ними, то как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
20. Можно ли пользоваться формулой закона Кулона для расчета силы взаимодействия между двумя объемными телами?

21. Как на основании закона Кулона для точечных зарядов определить силу взаимодействия между двумя объемными телами?
22. Каким образом проявляет себя электрическое поле?
23. Какую величину называют напряженностью электрического поля?
24. Напряженность электрического поля - это величина векторная или скалярная?
25. Какими двумя параметрами характеризуется напряженность электрического поля в данной точке пространства?
26. Каким образом величина напряженности электрического поля зависит от величины заряда, порождающего это поле?
27. Каким образом величина напряженности электрического поля зависит от расстояния до заряда, порождающего это поле?
28. Каким образом величина напряженности электрического поля зависит от величины пробного заряда?
29. Как связано направление вектора напряженности электрического поля и знак заряда, порождающего это поле?
30. Как связаны между собой направление вектора напряженности электрического поля и знак пробного заряда?
31. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
32. Как направлены линии напряженности?
33. Как выбирается густота линий напряженности электрического поля?
34. Где начинаются линии напряженности электрического поля?
35. Где заканчиваются линии напряженности электрического поля?
36. Нарисуйте линии напряженности электрического поля одиночного положительного заряда.
37. Нарисуйте линии напряженности электрического поля одиночного отрицательного заряда.
38. Нарисуйте линии напряженности электрического поля, образуемого диполем.
39. Как можно определить понятие "поток вектора напряженности электрического поля"?
40. Если поверхность представляет собой плоскую площадку, а величина напряженности поля в пределах площадки одинакова, и при этом вектор напряженности перпендикулярен поверхности, то как можно рассчитать поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
41. Если поверхность представляет собой плоскую площадку, а величина напряженности поля в пределах площадки одинакова, и при этом вектор напряженности не перпендикулярен поверхности, то как можно

- рассчитать поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
42. Что такое векторный элемент поверхности?
  43. Какой формулой определяется поток напряженности электрического поля через поверхность произвольной формы?
  44. Как выбирается направление нормали для замкнутых поверхностей?
  45. Чему равен поток напряженности электрического поля через замкнутую поверхность?
  46. Сформулируйте теорему Гаусса для случая охвата поверхностью отдельных зарядов.
  47. Сформулируйте теорему Гаусса для случая охвата поверхностью объемно распределенного заряда.
  48. Если число зарядов внутри замкнутой поверхности возрастет в четыре раза, то как изменится поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
  49. Если объемная плотность заряда внутри замкнутой поверхности в каждой точке уменьшится в четыре раза, то как изменится поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
  50. Если количество протонов и электронов внутри замкнутой поверхности одинаково, то чему равен поток напряженности электрического поля через эту поверхность?

### **Уровень курса**

1. Электрическое поле. Закон Кулона.
2. Напряженность электрического поля.
3. Суперпозиция полей. Линии напряженности.
4. Поток вектора напряженности электрического поля.
5. Теорема Гаусса.

## Лекція № 3

**Тема:** Поля тел различной формы. Потенциал.

**Оглавление**

Электрические поля заряженных тел различной формы.....	2
Поле бесконечной однородно заряженной плоскости.....	2
Поле двух разноименно заряженных плоскостей.....	3
Поле бесконечного заряженного цилиндра. ....	4
Поле заряженной сферической поверхности.....	6
Поле объемно заряженной сферы. ....	7
Потенциал .....	8
Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом .	9
Эквипотенциальные поверхности .....	10
Контрольные вопросы по теме .....	12
Уровень модуля.....	12
Уровень курса.....	14

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.

## Электрические поля заряженных тел различной формы

### *Поле бесконечной однородно заряженной плоскости.*

Рассмотрим поле, создаваемое бесконечной плоскостью, заряженной с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ ; для определенности будем считать заряд положительным. Из соображений симметрии вытекает, что напряженность в любой точке поля имеет направление, перпендикулярное к плоскости. В самом деле, поскольку плоскость бесконечна и заряжена однородно (т. е. с постоянной плотностью), нет никаких оснований для того, чтобы сила, действующая на пробный заряд, отклонялась в какую-либо сторону от нормали к плоскости. В симметричных относительно плоскости точках напряженность поля будет одинакова по величине и противоположна по направлению.

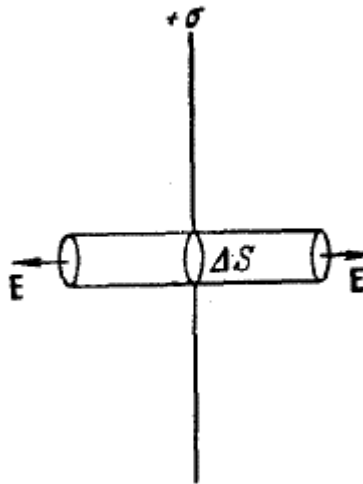


Рис. 3.1 Поверхность для применения теоремы Гаусса

Представим цилиндрическую поверхность с образующими, перпендикулярными к плоскости и основаниями величины  $\Delta S$ , расположенными относительно плоскости симметрично (рис. 3.1). Применим к этой поверхности теорему Гаусса. Поток через боковую часть поверхности будет отсутствовать, так как вектор  $\vec{E}$  направлен вдоль оси цилиндра и линии напряженности не пересекают боковую поверхность цилиндра. Вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен основаниям цилиндра, то есть через каждое основание проходит поток величиной  $E\Delta S$ . Таким образом, суммарный поток через всю поверхность цилиндра будет равен  $2E\Delta S$ . Внутри поверхности заключен заряд  $\sigma\Delta S$ . Согласно теореме Гаусса должно выполняться условие:

$$2E\Delta S = \frac{\sigma\Delta S}{\epsilon_0}, \quad (3.1)$$

откуда

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (3.2)$$

Полученный результат не зависит от длины цилиндра. Таким образом, на любых расстояниях от плоскости напряженность поля одинакова по величине. Картина линий напряженности выглядит так, как показано на рис. 3.2. Для отрицательно заряженной плоскости результат будет таким же, лишь направление вектора  $\vec{E}$  и линий напряженности изменится на обратное.

Если взять плоскость конечных размеров, например, заряженную тонкую пластинку, то полученный выше результат будет справедливым лишь для точек, расстояние которых от края пластинки значительно превышает расстояние от самой пластинки (на рис. 3.3 область этих точек обведена пунктирной кривой). По мере удаления от плоскости или приближения к ее краям поле будет все больше отличаться от поля бесконечной заряженной плоскости.

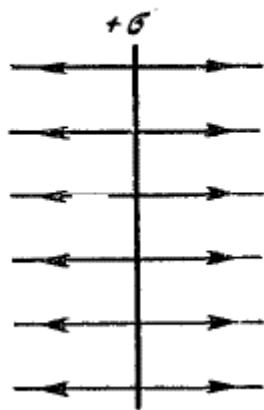


Рис. 3.2

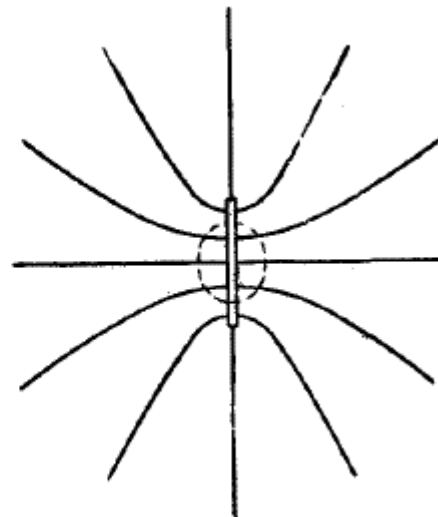


Рис. 3.3

Характер поля на больших расстояниях легко представить, если учесть, что на расстояниях, значительно превышающих размеры пластинки, создаваемое ею поле можно рассматривать как поле точечного заряда.

### ***Поле двух разноименно заряженных плоскостей.***

Поле двух параллельных бесконечных плоскостей, заряженных разноименно с одинаковой по величине постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ , можно найти как суперпозицию полей, создаваемых каждой из плоскостей в отдельности. Легко видеть (рис. 3.4), что в области между

плоскостями складываемые поля имеют одинаковое направление, так что результирующая напряженность равна

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (3.3)$$

Вне объема, ограниченного плоскостями, складываемые поля имеют противоположные направления, так что результирующая напряженность равна нулю.

Таким, образом, поле оказывается сосредоточенным между плоскостями. Напряженность поля во всех точках этой области одинакова по величине и по направлению. Поле, обладающее такими свойствами, называется однородным. Линии напряженности однородного поля представляют собой совокупность параллельных равноотстоящих прямых.

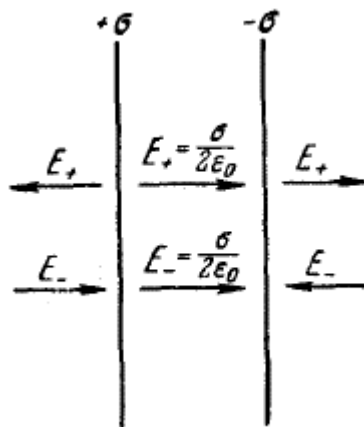


Рис. 3.4

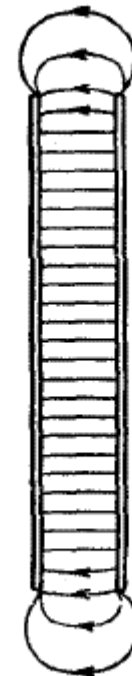


Рис. 3.5

Полученный результат приближенно справедлив и в случае плоскостей конечных размеров, если расстояние между плоскостями значительно меньше их линейных размеров (плоский конденсатор). В этом случае заметные отклонения поля от однородности и значения напряженности от  $\frac{\sigma}{\varepsilon_0}$  наблюдаются только вблизи краев пластин (рис. 3.5).

### **Поле бесконечного заряженного цилиндра.**

Рассмотрим поле, создаваемое бесконечной цилиндрической поверхностью радиуса  $R$ , заряженной с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ .



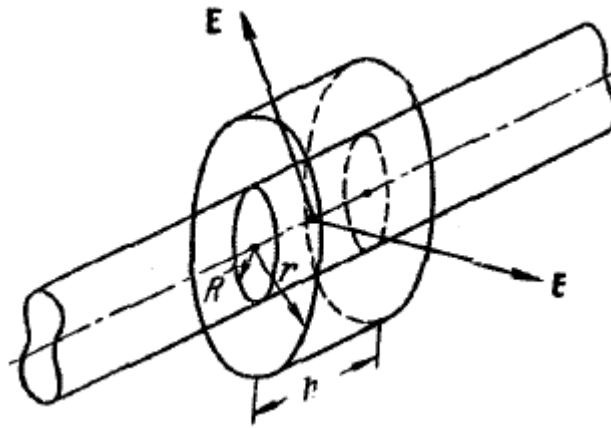


Рис. 3.6 Расчет поля цилиндра

Из соображений симметрии следует, что напряженность поля в любой точке должна быть направлена вдоль радиальной прямой, перпендикулярной к оси цилиндра, а величина напряженности может зависеть лишь от расстояния  $r$  от оси цилиндра. Представим себе мысленно коаксиальную с заряженной поверхностью замкнутую цилиндрическую поверхность радиуса  $r$  и высоты  $h$  (рис. 3.6). Поток через основания этого цилиндра равен нулю, для боковой поверхности  $E = E(r)$  (заряд считаем положительным). Следовательно, поток линий  $\vec{E}$  через эту замкнутую поверхность будет равен  $E(r) \cdot 2\pi r h$ . Если  $r > R$ , внутрь поверхности попадает заряд  $q = \lambda h$ , где  $\lambda$  – линейная плотность заряда. Применяя теорему Гаусса, получаем

$$E(r) \cdot 2\pi r h = \frac{\lambda h}{\varepsilon_0}, \quad (3.4)$$

откуда

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\lambda}{r} \quad (r \geq R) \quad (3.5)$$

Если  $r < R$ , рассматриваемая замкнутая поверхность не содержит внутри зарядов, вследствие чего  $E(r) = 0$ .

Таким образом, внутри заряженной цилиндрической поверхности бесконечной длины поле отсутствует. Напряженность поля вне поверхности определяется лишь линейной плотностью заряда  $\lambda$  и расстоянием  $r$  от оси цилиндра. Поле отрицательно заряженного цилиндра отличается от поля цилиндра, заряженного положительно, только направлением вектора  $\vec{E}$ .

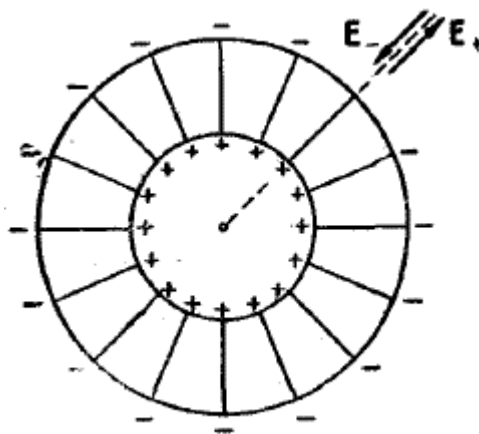


Рис. 3.7 Коаксиальная линия

Из формулы (3.5) следует, что, уменьшая радиус цилиндра  $R$  (при неизменной линейной плотности заряда  $\lambda$ , вблизи поверхности цилиндра можно получить очень сильное поле, т. е. поле с очень большой напряженностью  $E$ .

Учитывая, что  $\lambda = 2\pi R\sigma$ , для напряженности в непосредственной близости от поверхности ( $r = R$ ) в соответствии с (3.5) получаем

$$E(R) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (3.6)$$

С помощью принципа суперпозиции легко найти поле двух коаксиальных цилиндрических поверхностей, заряженных с одинаковой по величине, но отличающейся знаком линейной плотностью  $\lambda$  (рис. 3.7). Внутри меньшего и вне большего цилиндров поле отсутствует. В зазоре между цилиндрами величина напряженности поля определяется формулой (3.5). Это справедливо и для цилиндрических поверхностей конечной длины, если зазор между поверхностями значительно меньше их длины (цилиндрический конденсатор). Заметные отступления от поля поверхностей бесконечной длины будут наблюдаться только вблизи краев цилиндров.

### ***Поле заряженной сферической поверхности.***

Поле, создаваемое сферической поверхностью радиуса  $R$ , заряженной с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ , будет, очевидно, отличаться центральной симметрией. Это означает, что направление вектора  $\vec{E}$  в любой точке проходит через центр сферы, а величина напряженности является функцией расстояния  $r$  от центра сферы. Вообразим сферическую поверхность радиуса  $r$ . Для всех точек этой поверхности  $E = E(r)$ . Если  $r > R$ , внутрь поверхности попадает весь заряд  $q$ , создающий рассматриваемое поле. Следовательно,

$$E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad (3.7)$$

откуда

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (r \geq R) \quad (3.8)$$

Сферическая поверхность радиуса  $r$ , меньшего, чем  $R$ , не будет содержать зарядов, вследствие чего для  $r < R$  получается  $E(r) = 0$ .

Таким образом, внутри сферической поверхности, заряженной с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ , поле отсутствует. Вне этой поверхности поле имеет такой же вид, как поле точечного заряда той же величины, помещенного в центре сферы.

Заменив в (3.8)  $q$  через  $4\pi R^2\sigma$  и положив  $r = R$ , получим для напряженности поля вблизи заряженной сферической поверхности

$$E(R) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (3.9)$$

[ср. с формулой (3.6)].

Используя принцип суперпозиции, легко показать, что поле двух концентрических сферических поверхностей (сферический конденсатор), несущих одинаковые по величине и противоположные по знаку заряды  $+q$  и  $-q$ , сосредоточено в зазоре между поверхностями, причем величина напряженности поля в этом зазоре определяется формулой (3.8).

### **Поле объемно заряженной сферы.**

Рассмотрим сферу радиуса  $R$ , заряженную с постоянной объемной плотностью  $\rho$ . Поле такой сферы, очевидно, обладает центральной симметрией. Легко видеть, что для поля вне сферы получается тот же результат [в том числе и формула (3.8)], что и в случае поверхностно заряженной сферы. Однако для точек внутри сферы результат будет иным. В самом деле, сферическая поверхность радиуса  $r$  ( $r < R$ ) заключает в себе заряд, равный  $\rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3$ .

Следовательно, теорема Гаусса для такой поверхности запишется следующим образом:

$$E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (3.10)$$

откуда, заменяя  $\rho$  через  $\frac{q}{\frac{4}{3}\pi R^3}$ , получаем

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r \quad (r \leq R) \quad (3.11)$$

Таким образом, внутри сферы напряженность поля растет линейно с расстоянием  $r$  от центра сферы. Вне сферы напряженность убывает по такому же закону, как и у поля точечного Заряда.

### Потенциал

Как известно, сила при перемещении тела совершает работу. В случае электрического поля сила, действующая на заряд, зависит от напряженности поля. При перемещении единичного заряда (величина которого равна единице заряда – 1 Кл) по некоторому пути внутри поля, который можно обозначить как кривая  $L$ , совершается работа

$$A = \int_L \vec{E} d\vec{l} \quad (3.12)$$

Важно отметить, что электростатическое поле, то есть поле, создаваемое неподвижными зарядами, является *потенциальным*. Это означает, что работа (3.12) при перемещении заряда вдоль кривой  $L$  зависит только от того, где находится начальная и где находится конечная точки кривой  $L$ , а от конфигурации этой кривой – никак не зависит. В частности, если кривая заканчивается в той же точке, где и начиналась, тогда справедливо равенство

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0 \quad (3.13)$$

Это означает, что работа поля при перемещении заряда по замкнутому контуру (точно также, как и работа внешней силы при перемещении заряда по замкнутому контуру внутри электрического поля) равна нулю.

Если положительную работу при перемещении заряда совершает внешняя сила, то потенциальная энергия заряда возрастает. Если работа, которую выполняет внешняя сила, отрицательна, то потенциальная энергия заряда убывает.

*Потенциалом электрического поля  $\phi$*  в данной точке называется потенциальная энергия единичного заряда, находящегося в этой точке. Численно потенциал равен работе, которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки в бесконечность. Такую же по величине работу необходимо совершить против

сил электрического поля для того, чтобы переместить единичный положительный заряд из бесконечности в данную точку поля. При этом потенциал и работа имеют противоположные знаки

$$\varphi_a = -\int_a^{\infty} \vec{E} d\vec{l} \quad (3.14)$$

Принято считать, что потенциал электрического поля в бесконечности равен нулю. Можно показать, что потенциал электрического поля, образуемого точечным зарядом  $q_0$  на расстоянии  $r$  от этого заряда

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r} \quad (3.15)$$

Поскольку электростатическое поле является потенциальным, то работа, совершаемая полем при перемещении единичного положительного заряда из точки  $a$  в точку  $b$  равна разности потенциалов поля в этих двух точках

$$A = \varphi_a - \varphi_b \quad (3.16)$$

Если заряд, на который действует поле не единичный, и его величина равна  $q$ , тогда работа равна

$$A = q(\varphi_a - \varphi_b) \quad (3.17)$$

Следовательно, работа по удалению заряда  $q$  из точки  $a$  в бесконечность равна

$$A = q\varphi_a \quad (3.18)$$

Если имеется несколько зарядов, которые в совокупности образуют электрическое поле, тогда потенциал поля, создаваемого системой зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов в отдельности. В то время как напряженности поля складываются при наложении полей векторно, потенциалы складываются алгебраически. По этой причине вычисление потенциалов оказывается обычно гораздо проще, чем вычисление напряженностей электрического поля.

### **Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом**

Поскольку в соответствии с (3.14) потенциал представляет собой интеграл от напряженности, взятый по кривой, то напряженность поля, соответственно, равна производной от потенциала по участку кривой

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{d\vec{l}} \quad (3.19)$$

Через  $\vec{l}$  и соответственно  $d\vec{l}$  обозначено произвольно выбранное направление в пространстве. Если перейти к проекциям  $\vec{E}$  и  $d\vec{l}$  на оси координат, то получаем

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} \quad (3.20)$$

откуда

$$\vec{E} = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z = -\left(\vec{i}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) \quad (3.21)$$

Выражение, находящееся в скобках, называется градиентом скаляра. В рассматриваемом случае это градиент скаляра  $\varphi$  и обозначается  $\text{grad } \varphi$  или  $\nabla\varphi$ . Используя понятие градиента, можно записать

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \quad (3.22)$$

### Эквипотенциальные поверхности

Для наглядного изображения поля можно вместо линий напряженности воспользоваться поверхностями равного потенциала или эквипотенциальными поверхностями. Как следует из ее названия, эквипотенциальная поверхность – это такая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал.

Направление нормали к эквипотенциальной поверхности будет совпадать с направлением вектора  $\vec{E}$  в той же точке. Соответственно, линии напряженности в каждой точке ортогональны эквипотенциальным поверхностям.

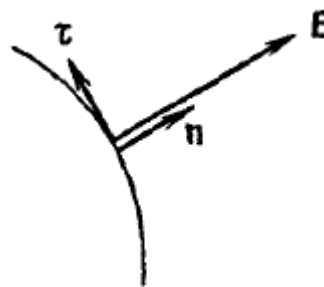


Рис. 3.8

Эквипотенціальную поверхность можно провести через любую точку поля. Следовательно, таких поверхностей может быть построено бесконечное множество. Условливаются, однако, проводить поверхности таким образом, чтобы разность потенциалов  $\varphi_{i+1} - \varphi_i$  для двух соседних поверхностей была всюду одна и та же. Тогда по густоте эквипотенциальных поверхностей можно судить о величине напряженности поля. Действительно, чем гуще располагаются эквипотенциальные поверхности, тем быстрее изменяется потенциал при перемещении вдоль нормали к поверхности. Следовательно, тем больше в данном месте  $\text{grad } \varphi$ , а значит и  $\vec{E}$ .

На рис. 3.9 показаны эквипотенциальные поверхности (точнее, их пересечения с плоскостью чертежа) для поля точечного заряда. В соответствии с характером изменения  $\vec{E}$  эквипотенциальные поверхности при приближении к заряду становятся гуще.

Для однородного поля эквипотенциальные поверхности, очевидно, представляют собой систему равноотстоящих друг от друга плоскостей, перпендикулярных к направлению поля.

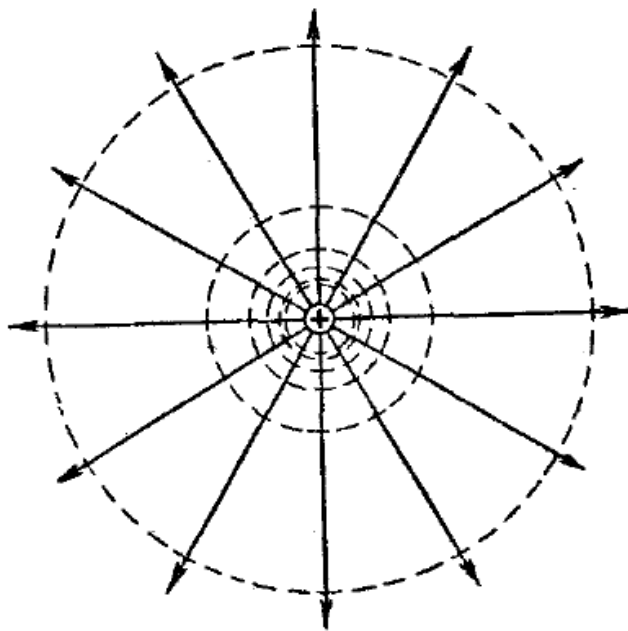


Рис. 3.9

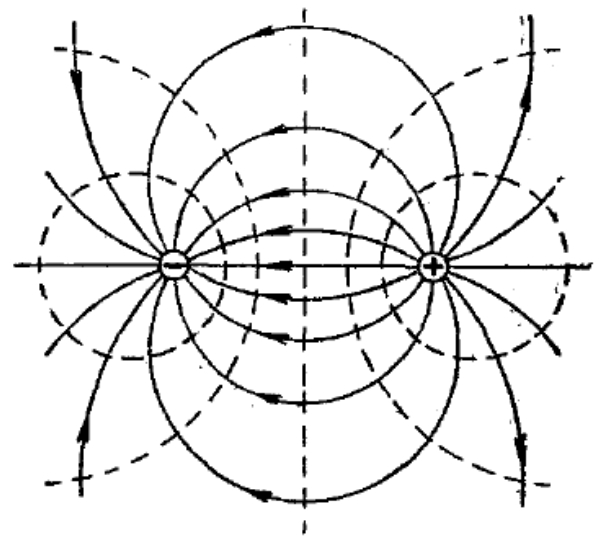


Рис. 3.10

На рис. 3.10 изображены эквипотенциальные поверхности и линии напряженности для поля диполя. Из рис. 3.9 и 3.10 видно, что при одновременном использовании и эквипотенциальных поверхностей, и линий напряженности картина поля получается особенно наглядной.

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительно заряженной бесконечной пластины.
2. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля отрицательно заряженной бесконечной пластины.
3. Запишите формулу, связывающую плотность электрического заряда бесконечной пластины и величину напряженности электрического поля, создаваемого этой пластиной.
4. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительно заряженной пластины конечных размеров.
5. Нарисуйте, как выглядит электрическое поле пластины конечных размеров на расстояниях, значительно превышающих размеры пластины.
6. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительного точечного заряда.
7. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля отрицательного точечного заряда.
8. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля диполя.
9. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя противоположно заряженными с одинаковой величиной плотности заряда бесконечными пластинами.
10. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя противоположно заряженными с одинаковой величиной плотности заряда пластинами конечных размеров.
11. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя противоположно заряженными с одинаковой величиной плотности заряда пластинами на расстояниях, с которых пластины могут рассматриваться как точки.
12. Запишите формулу, связывающую значение напряженности электрического поля между двумя противоположно заряженными бесконечными пластинами с поверхностной плотностью заряда этих пластин.
13. Запишите формулу, связывающую значение напряженности электрического поля за пределами двух противоположно заряженных бесконечных пластин с поверхностной плотностью заряда этих пластин.



14. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительно заряженного бесконечного полого цилиндра.
15. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля снаружи заряженного бесконечного полого цилиндра.
16. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля вблизи поверхности заряженного бесконечного полого цилиндра.
17. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля внутри заряженного бесконечного полого цилиндра.
18. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя заряженными бесконечными полыми цилиндрами.
19. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля за пределами внешнего из двух противоположно заряженных бесконечных полых цилиндров.
20. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля в пространстве, которое ограничено внутренним из двух противоположно заряженных бесконечных полых цилиндров.
21. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля снаружи заряженной бесконечной полый сферы.
22. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля внутри заряженной бесконечной полый сферы.
23. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля вблизи поверхности заряженной бесконечной полый сферы.
24. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя полыми сферами.
25. Сравните формулы для значения напряженности электрического поля вблизи поверхности бесконечной пластины, вблизи поверхности бесконечного полого цилиндра и вблизи поверхности полый сферы. Как бы Вы объяснили сходство и различие этих формул?
26. Внутри какого конденсатора более высокая напряженность электрического поля: составленного из двух пластин, составленного из двух цилиндров, составленного из двух сфер?
27. Какой формулой выражается работа, совершаемую полем при перемещении единичного заряда вдоль кривой  $L$ ?
28. Чему равна работа электрического поля при перемещении электрического заряда по замкнутой кривой?
29. В чем состоит характерная особенность поля, которое является потенциальным?
30. Почему электрическое поле называют потенциальным?
31. Что называется потенциалом электрического поля?

32. Чему численно равен потенциал электрического поля в данной точке?
33. Чему равен потенциал электрического поля в бесконечности? Как установлено это значение?
34. Как через потенциал выразить работу поля по перемещению заряда величиной  $q$  из точки  $a$  в точку  $b$ ?
35. Как получить потенциал электрического поля, образованного несколькими зарядами, в некоторой точке, если известны потенциалы полей, создаваемых каждым из этих зарядов в отдельности, в данной точке?
36. Как связаны напряженность и потенциал электрического поля в данной точке?
37. Что называют эквипотенциальной поверхностью?
38. Как связано направление вектора напряженности электрического поля в данной точке с формой эквипотенциальной поверхности в этой точке?
39. На каком расстоянии друг от друга на рисунке обычно проводят линии эквипотенциальных поверхностей?
40. Нарисуйте эквипотенциальные линии электрического поля, образованного точечным зарядом.
41. Нарисуйте эквипотенциальные линии электрического поля, образованного диполем.

### **Уровень курса**

1. Электрическое поле бесконечной однородно заряженной пластины. Поле двух разноименно заряженных пластин.
2. Электрическое поле бесконечного заряженного цилиндра.
3. Электрическое поле заряженной сферической поверхности. Поле объемно заряженной сферы.
4. Потенциал электрического поля.
5. Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом.
6. Эквипотенциальные поверхности.

## Лекція № 4

**Тема:** Электрическое поле в диэлектрике. Сегнетоэлектрики. Пьезоэлектрики. Электрет. Проводник в электрическом поле.

**Оглавление**

Электрическое поле в диэлектриках .....	2
Полярные и неполярные молекулы.....	2
Диполь в однородном электрическом поле.....	3
Поляризация диэлектриков.....	4
Описание поля в диэлектрике.....	6
Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков .....	7
Сегнетоэлектрики.....	8
Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.....	9
Электрет .....	11
Проводники в электрическом поле .....	11
Равновесие зарядов на проводнике .....	11
Проводник во внешнем электрическом поле.....	14
Электрическая емкость.....	15
Конденсаторы .....	16
Контрольные вопросы по теме .....	19
Уровень модуля.....	19
Уровень курса.....	21

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.

## Электрическое поле в диэлектриках

### Полярные и неполярные молекулы

Если диэлектрик внести в электрическое поле, то это поле и сам диэлектрик претерпевают существенные изменения. Чтобы понять, почему это происходит, нужно учесть, что в составе атомов и молекул имеются положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны. Электроны движутся в пределах атома или молекулы с огромной скоростью, непрерывно изменяя свое положение относительно ядер. Поэтому действие каждого электрона на внешние заряды будет примерно таким, как если бы он находился в покое в некоторой точке, полученной усреднением положения электрона по времени. Эту точку условно можно назвать "центром тяжести" электрона.

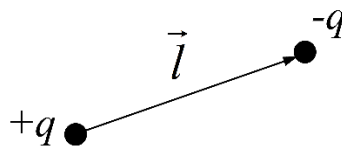


Рис. 4.1

В отсутствие внешнего электрического поля центры тяжести положительных и отрицательных зарядов внутри молекулы вещества могут либо совпадать, либо могут быть сдвинутыми друг относительно друга. В последнем случае молекула эквивалентна электрическому диполю и называется *полярной*. Напомним, что диполь - это совокупность близко расположенных двух одинаковых по величине, но разных по знаку точечных зарядов  $+q$  и  $-q$  (рис. 4.1). Полярная молекула обладает собственным электрическим моментом  $\vec{p}$ :

$$\vec{p} = q\vec{l} , \quad (4.1)$$

где  $q$  - суммарный заряд всех сдвинутых внутри молекулы положительных элементарных зарядов, который равен сумме всех сдвинутых внутри молекулы отрицательных элементарных зарядов,  $\vec{l}$  - вектор, соединяющий центры тяжести всей совокупности смещенных положительных и всей совокупности смещенных отрицательных элементарных зарядов молекулы. При этом, несмотря на наличие электрического момента, молекула по своему электрическому заряду остается нейтральной.

Молекула, у которой центры тяжести зарядов разных знаков в отсутствие поля совмещены ( $l = 0$ ), собственным электрическим моментом не обладает. Такая молекула называется *неполярной*. Однако, под действием

внешнего электрического поля заряды в неполярной молекуле смещаются друг относительно друга: положительные по направлению поля, отрицательные против поля. В результате молекула приобретает электрический момент, величина которого, как показывает опыт, пропорциональна напряженности поля. Коэффициент пропорциональности записывают в виде  $\epsilon_0\beta$ , где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, а  $\beta$  – величина, называемая *поляризуемостью молекулы*. Учитывая, что направления  $\vec{p}$  и  $\vec{E}$  совпадают, можно написать

$$\vec{p} = \beta\epsilon_0\vec{E} \quad (4.2)$$

Процесс поляризации неполярной молекулы протекает так, как если бы положительные и отрицательные заряды молекулы были связаны друг с другом упругими силами. Поэтому говорят, что неполярная молекула ведет себя во внешнем поле как упругий диполь.

Действие внешнего поля на полярную молекулу сводится в основном к стремлению повернуть молекулу так, чтобы ее электрический момент установился по направлению поля. На величину электрического момента внешнее поле практически не влияет. Следовательно, полярная молекула ведет себя во внешнем поле как жесткий диполь.

Поскольку молекулы по электрическим свойствам эквивалентны диполям, для понимания явлений в диэлектриках нужно знать, как ведет себя диполь во внешнем электрическом поле.

### **Диполь в однородном электрическом поле**

Если диполь поместить в однородное электрическое поле, образующие диполь заряды  $+q$  и  $-q$  окажутся под действием равных по величине, но противоположных по направлению сил  $f_1$  и  $f_2$  (рис. 4.2). Эти силы образуют пару, плечо которой зависит от ориентации диполя относительно поля и равно  $l \sin \alpha$ .

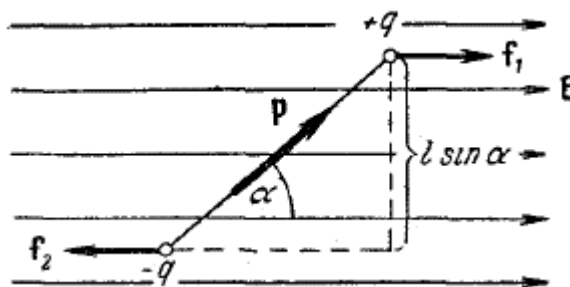


Рис. 4.2

Модуль каждой из сил равен  $qE$ . Умножив его на плечо, получим величину момента пары сил, действующих на диполь:

$$M = qEl \sin \alpha = pE \sin \alpha \quad (4.3)$$

где  $p$  – электрический момент диполя.

Формула (4.3), очевидно, может быть написана в векторном виде

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (4.4)$$

Момент сил (4.4) стремится повернуть диполь так, чтобы его электрический момент  $\vec{p}$  установился по направлению поля.

### **Поляризация диэлектриков**

В отсутствие внешнего электрического поля дипольные моменты молекул диэлектрика или равны нулю (неполярные молекулы), или распределены по направлениям в пространстве хаотическим образом (полярные молекулы). В обоих случаях суммарный электрический момент диэлектрика равен нулю. Под действием внешнего поля диэлектрик поляризуется. Это означает, что результирующий электрический момент диэлектрика становится отличным от нуля. В качестве величины, характеризующей степень поляризации диэлектрика, естественно взять электрический момент единицы объема. Если поле или диэлектрик (или оба они) неоднородны, степень поляризации в разных точках диэлектрика будет различна. Чтобы охарактеризовать поляризацию в данной точке, нужно выделить заключающий в себе эту точку физически бесконечно малый объем  $\Delta V$ , найти сумму  $\sum_{\Delta V} \vec{p}_i$  моментов, заключенных в этом объеме молекул, и взять отношение

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V} \quad (4.5)$$

Величина  $\vec{P}$ , определяемая формулой (4.5), называется *вектором поляризации диэлектрика*. У диэлектриков любого типа вектор поляризации связан с напряженностью поля в той же точке простым соотношением

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \quad (4.6)$$

где  $\chi$  – безразмерная, не зависящая от  $\vec{E}$  величина, называемая *диэлектрической восприимчивостью диэлектрика*. В то же время размерность

вектором поляризації диелектрика  $\vec{P}$  и напряженности электрического поля  $E$  совпадают.

По существу, вектор поляризации характеризует дополнительное электрическое поле, возникающее внутри диелектрика под действием внешнего электрического поля. Поляризованные под действием внешнего поля молекулы выстраиваются таким образом, чтобы отрицательная сторона молекулы была направлена в сторону положительного заряда, порождающего внешнее поле, а положительная сторона – соответственно к отрицательному заряду. Вектор  $\vec{P}$ , как уже было показано выше (4.5), – это усреднение по объему, среднее значение электрических моментов молекул-диполей в единице объема вещества диелектрика. Если очень условно представить эту единицу объема вещества в виде некоторого диполя, заряды которого расположены по краям этого объема и расположены на одной и той же линии напряженности, то мы увидим, что эти два заряда диполя создают собственное электрическое поле  $\vec{E}'$ , которое направлено против внешнего  $\vec{E}_0$  (рис. 4.3).

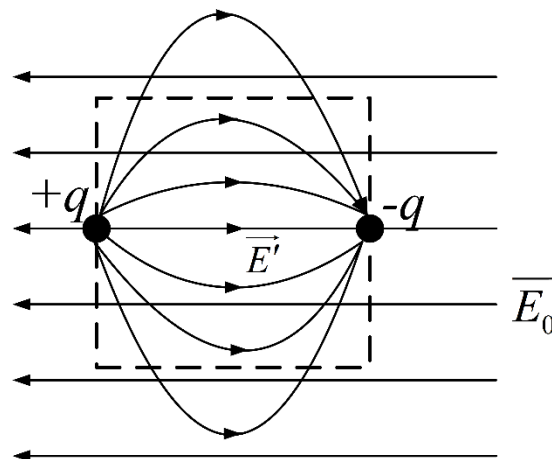


Рис. 4.3

То есть, суммарное, действующее внутри диелектрика электрическое поле  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$  оказывается слабее, чем внешнее поле, так как  $\vec{E}_0$  и  $\vec{E}'$  всегда направлены в противоположные стороны, встречно. Можно сказать и по-другому: действующее внутри диелектрика электрическое поле всегда слабее того поля, которое действовало бы, если бы в этом месте был вакуум, а не диелектрик. Таким образом, поляризация диелектриков приводит к ослаблению электрического поля. В физике установлено, что величина, на которую ослабляется поле, равна величине вектора поляризации диелектрика  $\vec{P}$ .

### Описание поля в диэлектрике

Введем понятие электрического смещения.

*Электрическим смещением* называется величина, определяемая соотношением

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (4.7)$$

В вакууме, где отсутствует поляризация, смещение и напряженность электрического поля равны с точностью до множителя  $\varepsilon_0$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (4.8)$$

Электрическое смещение также иногда называют "электрической индукцией".

Очень важно отметить, что величина  $\vec{D}$  не зависит от того, где распространяется электрическое поле: в вакууме или в диэлектрике. В то время как напряженность зависит. Величина смещения напрямую связана с зарядом, который продуцирует электрическое поле и ни с чем другим. Эта связь определяется теоремой Гаусса для общего случая, охватывающего как вакуум, так и диэлектрики:

$$\iint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum q_i \quad (4.9)$$

Формула (4.9) выражает **теорему Гаусса** для вектора электрического смещения: *поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности свободных зарядов.*

Если свободные заряды распределены внутри замкнутой поверхности непрерывно с объемной плотностью  $\rho$ , то формула (4.9) видоизменяется следующим образом:

$$\iint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum \iiint_V \rho dV \quad (4.10)$$

В вакууме  $\vec{P} = 0$ , а  $\vec{D}$  определяется выражением (4.8). Тогда формулы (4.9) и (4.10) переходят в формулы (2.14) и (2.15) из лекции №2.

Подставив в формулу (4.7) выражение (4.6) для  $\vec{P} = 0$ , получим

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \chi \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \quad (4.11)$$



Безразмерную величину

$$\varepsilon = 1 + \chi \quad (4.12)$$

называют *относительной диэлектрической проницаемостью* или просто *диэлектрической проницаемостью среды*. Следовательно, соотношение (4.11) можно записать в виде

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \quad (4.13)$$

Это самое простое и в то же время фундаментальное соотношение между векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$ , на основе которого описывается электрическое поле в общем случае: и в вакууме, и внутри диэлектрического вещества. Очевидно, что для вакуума  $\varepsilon = 1$ .

Единицей электрического смещения служит кулон на квадратный метр (Кл/м<sup>2</sup>).

Величину

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon \quad (4.14)$$

называют абсолютной диэлектрической проницаемостью среды. Очевидно, что абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума  $\varepsilon_a = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

### **Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков**

<i>Твердые тела</i>		
Вещество	$\rho$ , Ом·см	$\varepsilon$
Бакелит	$10^{13} - 10^{14}$	4,5
Битум	$10^{15} - 10^{16}$	2,5–3
Бумага сухая	$10^{13} - 10^{14}$	2–2,5
Гетинакс	$10^{10} - 10^{11}$	5–6
Каучук	$10^{16}$	2,4
Кварц	$10^{14} - 10^{15}$	3,5–4,5
Керамика конденсаторная	$10^{11}$	10–200
Метатитанат бария	-	2000
Парафин	$3 \cdot 10^{18}$	2–2,3
Плексиглас (оргстекло)	$10^{13}$	3,5
Полистирол	$10^{17} - 10^{19}$	2,4–2,6

Полихлорвинил	$10^{16}$	3
Полиетилен	$10^{16}$	2,3–2,4
Сегнетова соль	-	500
Слюда	$10^{16}$	5,7–7
Стекло	$10^8–10^{17}$	4–16
Текстолит	$10^9–10^{10}$	-
Фарфор	$10^{15}$	4,5–4,7
Шеллак	$10^{15}–10^{16}$	3,5
Эбонит	$10^{15}–10^{16}$	2,5–3
Янтарь	$10^{17}–10^{20}$	2,8
<i>Жидкости</i>		
Бензин	$10^{12}$	2
Вода дистиллированная	$10^5–10^6$	81
Масло вазелиновое	$10^{16}$	2
Масло касторовое	$10^{11}$	4,6–4,8
Масло трансформаторное	$10^{12}–10^{15}$	2,2
Скипидар	$10^{13}$	2,2
Спирт этиловый	$10^6–10^7$	27
<i>Газы (760 мм рт. ст.)</i>		
Азот	-	1,00054
Воздух (сухой)	$10^{16}–10^{17}$ (в очень слабых полях)	1,00025
Гелий	-	1,00007
Кислород	-	1,00055
Углекислый газ	-	1,0009

### Сегнетоэлектрики

Существует группа веществ, которые могут обладать спонтанной (самопроизвольной) поляризацией в отсутствие внешнего поля. Это явление было открыто первоначально для сегнетовой соли, в связи с чем все подобные вещества получили название сегнетоэлектриков. Сегнетоэлектрики отличаются от остальных диэлектриков рядом характерных особенностей:

1. В то время как у обычных диэлектриков  $\epsilon$  составляет несколько единиц, достигая в виде исключения нескольких десятков (у воды, например,  $\epsilon = 81$ ), диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков бывает порядка нескольких тысяч.

2. Зависимость  $D$  от  $E$  не является линейной, следовательно, диэлектрическая проницаемость оказывается зависящей от напряженности поля (ветвь 1 на кривой рис. 4.4).

3. При изменениях поля значения вектора поляризации  $P$  (а следовательно, и  $D$ ) отстают от напряженности поля  $E$ , в результате чего  $P$  и  $E$  определяются не только величиной  $E$  в данный момент, но и предшествующими значениями  $E$ , т. е. зависят от предыстории диэлектрика. Это явление называется гистерезисом (от греческого «гистерезис» — запаздывание). При циклических изменениях поля зависимость  $P$  от  $E$  следует изображенной на рис. 4.4 кривой, называемой петлей гистерезиса.

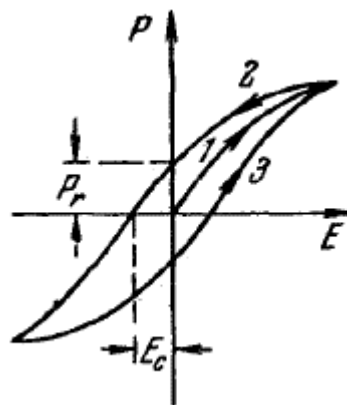


Рис. 4.4

Поведение поляризации сегнетоэлектриков аналогично поведению намагничивания ферромагнетиков (о которых речь пойдет в последующих лекциях). По этой причине сегнетоэлектрики иногда называют ферроэлектриками.

Для каждого сегнетоэлектрика имеется температура, выше которой вещество утрачивает необычные свойства и становится нормальным диэлектриком. Эта температура называется точкой Кюри. Сегнетова соль имеет две точки Кюри: при  $-15^{\circ}\text{C}$  и  $+22,5^{\circ}\text{C}$ , причем она ведет себя как сегнетоэлектрик лишь в температурном интервале, ограниченном указанными значениями. При температуре ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  и выше  $+22,5^{\circ}\text{C}$  электрические свойства сегнетовой соли обычны.

Очень важное практическое значение имеет другой открытый сегнетоэлектрик — метатитанат бария, точка Кюри которого равна  $125^{\circ}\text{C}$ .

### **Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект**

Некоторые кристаллы, не имеющие центра симметрии (в том числе все сегнетоэлектрики), при деформации поляризуются. Это явление называется прямым пьезоэлектрическим эффектом или просто пьезоэлектрическим

ефектом. Величина поляризації пропорциональна деформации, а, следовательно, в пределах упругости и механическому напряжению. При изменении знака деформации знак поляризации меняется также на обратный.

Важнейшими пьезоэлектриками (т. е. пьезоэлектрическими кристаллами) являются кварц, сегнетова соль, метатитанат бария и др.

Кристаллы кварца принадлежат к гексагональной системе. Если вырезать из кристалла кварца пластинку, перпендикулярную к кристаллографической оси  $a$ , и подвергнуть ее сжатию вдоль этой оси, то на гранях пластинки появляются связанные заряды (на рис. 4.5 пластинка расположена так, что кристаллографическая ось  $c$  направлена на нас). То же самое происходит, если пластинку подвергнуть растяжению вдоль оси  $OO$ , перпендикулярной к кристаллографическим направлениям  $a$  и  $c$ . В последнем случае эффект называют поперечным, в первом случае — продольным. При изменении знака деформации (т.е. при растяжении вдоль  $a$  или сжатии вдоль  $OO$ ) на гранях пластинки появляются связанные заряды другого знака. Для практического использования пьезоэлектрического эффекта на грани пластинки накладывают металлические обкладки. Если эти обкладки включить в замкнутую цепь, то при изменениях деформации кристалла в цепи будут возникать импульсы тока. Такие процессы протекают, например, в пьезоэлектрическом микрофоне — знакопеременная деформация пластинки под действием звуковой волны преобразуется в переменный ток той же частоты.

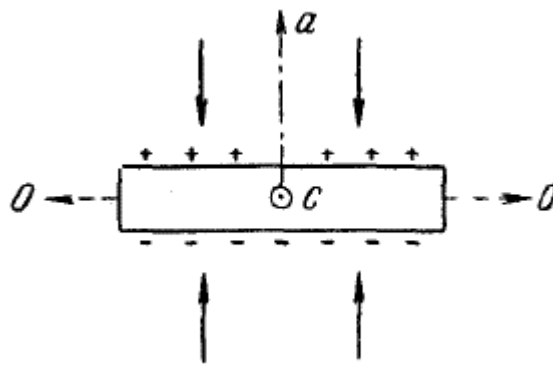


Рис 4.5

Наряду с описанным выше прямым эффектом, у пьезоэлектрических кристаллов наблюдается обратный эффект, заключающийся в том, что поляризация под действием электрического поля сопровождается механическими деформациями кристалла. Таким образом, если на металлические обкладки изображенной на рис. 4.5 пластинки подать переменное электрическое напряжение, то пластинка будет попеременно,

растягиваться и сжиматься вдоль оси  $a$  (одновременно происходят сжатие и растяжение вдоль оси  $OO$ ), т. е. в ней возбуждятся механические колебания. Эти колебания станут особенно интенсивными, если частота переменного напряжения совпадает с собственной (резонансной) частотой пластинки.

Такие настроенные в резонанс пьезоэлектрические пластинки используются для возбуждения ультразвуковых волн, для стабилизации частоты генераторов электрических колебаний в радиотехнике и т. п.

## Электрет

Электрет – диэлектрик, длительное время сохраняющий поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, которое привело к поляризации (или заряджению) этого диэлектрика, и создающий в окружающем пространстве квазипостоянное электрическое поле.

## Проводники в электрическом поле

### Равновесие зарядов на проводнике

Носители заряда в проводнике способны перемещаться под действием сколь угодно малой силы. Поэтому равновесие зарядов на проводнике может наблюдаться лишь при выполнении следующих условий (рис. 4.6):

1. Напряженность поля всюду внутри проводника должна быть равна нулю

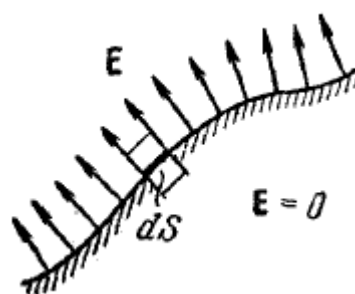
$$E = 0 \quad (4.15)$$

Это означает, что потенциал внутри проводника должен быть постоянным ( $\varphi = const$ ).

2. Напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности

$$E = E_n \quad (4.16)$$

Следовательно, в случае равновесия зарядов поверхность проводника будет эквипотенциальной.



## Рис. 4.6

Если проводящему телу сообщить некоторый заряд  $q$ , то он распределится так, чтобы соблюдались условия равновесия. Представим себе мысленно произвольную замкнутую поверхность, полностью заключенную в пределах тела. Поскольку при равновесии зарядов поле в каждой точке внутри проводника отсутствует, поток вектора электрического смещения через поверхность равен нулю. Согласно теореме Гаусса алгебраическая сумма зарядов внутри поверхности также будет равна нулю. Это справедливо для поверхности любых размеров, проведенной внутри проводника произвольным образом. Следовательно, при равновесии ни в каком месте внутри проводника не может быть избыточных зарядов – все они расположатся по поверхности проводника с некоторой плотностью  $\sigma$ .

Так как в состоянии равновесия внутри проводника избыточных зарядов нет, удаление вещества из некоторого объема, взятого внутри проводника, никак не отразится на равновесном расположении зарядов. Таким образом, избыточный заряд распределяется на полой проводнике так же, как и на сплошном, т. е. по его наружной поверхности. На поверхности полости в состоянии равновесия избыточные заряды располагаться не могут. Этот вывод вытекает также из того, что одноименные элементарные заряды, образующие данный заряд  $q$ , взаимно отталкиваются и, следовательно, стремятся расположиться на наибольшем расстоянии друг от друга.

Напряженность поля вблизи поверхности проводника

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (4.17)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник.

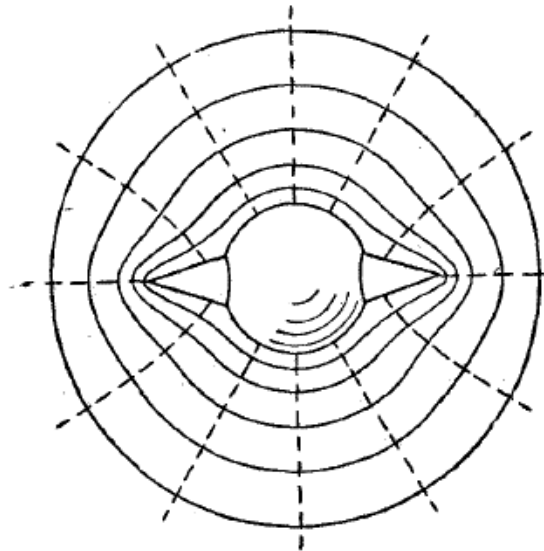


Рис. 4.7

Рассмотрим поле, создаваемое изображенным на рис. 4.7 заряженным проводником. На больших расстояниях от проводника эквипотенциальные поверхности имеют характерную для точечного заряда форму сферы (на рисунке для экономии места сферическая поверхность изображена на небольшом расстоянии от проводника; пунктиром показаны линии напряженности поля). По мере приближения к проводнику эквипотенциальные поверхности становятся все более сходными с поверхностью проводника, которая, как мы знаем, является эквипотенциальной. Вблизи выступов эквипотенциальные поверхности располагаются гуще, значит и напряженность поля здесь больше. Отсюда согласно (4.17) получается, что плотность зарядов на выступах особенно велика. К тому же выводу можно прийти, учитывая, что из-за взаимного отталкивания заряды стремятся расположиться как можно дальше друг от друга.

Вблизи углублений в проводнике (рис. 4.8) эквипотенциальные поверхности расположены реже. Соответственно напряженность поля и плотность зарядов в этих местах будет меньше. Вообще, плотность зарядов при данном потенциале проводника определяется кривизной поверхности — она растет с увеличением положительной кривизны (выпуклости) и убывает с увеличением отрицательной кривизны (вогнутости). Особенно велика бывает плотность зарядов на остриях.

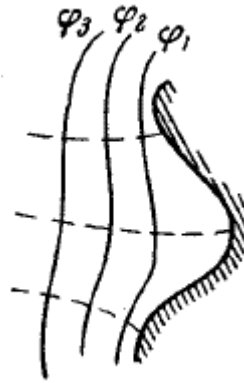


Рис. 4.8

Поэтому напряженность поля вблизи остриев может быть настолько большой, что происходит ионизация молекул газа, окружающего проводник. Ионы иного знака, чем  $q$ , притягиваются к проводнику и нейтрализуют его заряд. Ионы того же знака, что и  $q$ , начинают двигаться от проводника, увлекая с собой нейтральные молекулы газа. В результате возникает ощутимое движение газа, называемое электрическим ветром. Заряд проводника уменьшается, он как бы стекает с острия и уносится ветром. Поэтому такое явление называют истечением заряда с острия.

### ***Проводник во внешнем электрическом поле***

При внесении незаряженного проводника в электрическое поле носители заряда приходят в движение: положительные в направлении вектора  $E$ , отрицательные – в противоположную сторону. В результате у концов проводника возникают заряды противоположного знака, называемые индуцированными зарядами (рис. 4.9; пунктиром показаны линии напряженности внешнего поля). Поле этих зарядов направлено противоположно внешнему полю. Таким образом, накапливание зарядов у концов проводника приводит к ослаблению в нем поля. Перераспределение носителей заряда происходит до тех пор, пока не будут выполнены условия (4.15) и (4.16), т. е. пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю, а линии напряженности вне проводника перпендикулярными к его поверхности (рис. 4.9). Следовательно, нейтральный проводник, внесенный в электрическое поле, разрывает часть линий напряженности – они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных.



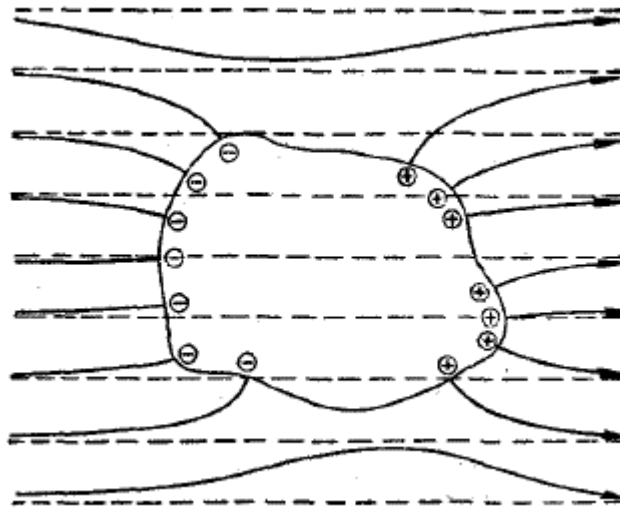


Рис. 4.9

Индукционные заряды распределяются по внешней поверхности проводника. Если внутри проводника имеется полость, то при равновесном распределении индуцированных зарядов поле внутри нее также обращается в нуль. На этом основывается электростатическая защита. Когда какой-то прибор хотят защитить от воздействия внешних полей, его окружают проводящим футляром (экраном). Внешнее поле компенсируется внутри экрана возникающими на его поверхности индуцированными зарядами. Подобный экран действует хорошо и в том случае, если его сделать не сплошным, а в виде густой сетки.

### **Электрическая емкость**

Сообщенный проводнику заряд распределяется по его поверхности так, чтобы напряженность поля внутри проводника была равна нулю. Если проводнику, уже несущему заряд  $q$ , сообщить еще заряд той же величины, то второй заряд должен распределиться по проводнику точно таким же образом, как и первый, в противном случае он создаст в проводнике поле, не равное нулю. Таким образом, различные по величине заряды распределяются на проводнике подобным образом, т. е. отношение плотностей заряда в двух произвольных точках поверхности проводника при любой величине заряда будет одно и то же. Отсюда вытекает, что потенциал уединенного проводника пропорционален находящемуся на нем заряду. Действительно, увеличение в некоторое число раз заряда приводит к увеличению в то же число раз напряженности поля в каждой точке окружающего проводник пространства. Следовательно, в такое же число раз возрастет работа переноса по любому пути единичного заряда из бесконечности на поверхность проводника, т. е. потенциал проводника. Таким образом, для уединенного проводника

$$q = C\varphi \quad (4.18)$$

Коэффициент пропорциональности  $C$  между потенциалом и зарядом называется емкостью (электрической емкостью или просто емкостью) проводника. Из (4.18) следует, что

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (4.19)$$

Емкость численно равна заряду, сообщение которого проводнику повышает его потенциал на единицу.

Пользуясь приведенными ранее выражениями можно показать, что емкость уединенного шара радиуса  $R$ , погруженного в однородный безграничный диэлектрик с относительной проницаемостью  $\varepsilon$ , равна

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R \quad (4.20)$$

За единицу емкости принимают емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 вольт при сообщении ему заряда в 1 кулон. Эта единица емкости называется фарадой (Ф).

Емкостью в одну фараду обладал бы уединенный шар радиуса  $9 \cdot 10^9$  м, то есть радиусом, примерно в 1500 раз большим радиуса Земли. Таким образом, фарада – очень большая величина. Поэтому на практике пользуются единицами, равными долям фарады – микрофарадой (мкФ) и пикофарадой (пФ), которые определяются следующим образом:

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ ф},$$

$$1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ ф}.$$

### **Конденсаторы**

Уединенные проводники обладают малой емкостью. Даже шар таких размеров, как Земля, имеет емкость всего лишь 700 мкФ. Вместе с тем на практике бывает потребность в устройствах, которые при небольшом относительно окружающих тел потенциале накапливали бы на себе («конденсировали») заметные по величине заряды. В основу таких устройств, называемых конденсаторами, положен тот факт, что емкость проводника возрастает при приближении к нему других тел. Действительно, под действием поля, создаваемого заряженным проводником, на поднесенном к нему теле возникают индуцированные (на проводнике) или связанные (на диэлектрике) заряды. Заряды, противоположные по знаку заряду проводника  $q$ , располагаются ближе к проводнику, чем одноименные с  $q$ , и, следовательно, оказывают большее влияние на его потенциал. Поэтому при поднесении к заряженному проводнику какого-либо тела потенциал проводника

уменьшается по абсолютной величине. Согласно формуле (4.19) это означает увеличение емкости проводника.

Конденсаторы делают в виде двух проводников, расположенных близко друг к другу. Образующие конденсатор проводники называют его обкладками. Чтобы внешние тела не оказывали воздействия на емкость конденсатора, обкладкам придают такую форму и так располагают их друг относительно друга, чтобы поле, создаваемое накапливаемыми на них зарядами, было полностью сосредоточено внутри конденсатора. Этому условию удовлетворяют две пластинки, расположенные близко друг к другу, два коаксиальных цилиндра и две концентрические сферы. Соответственно бывают плоские, цилиндрические и сферические конденсаторы.

Поскольку поле заключено внутри конденсатора, линии электрического смещения начинаются на одной обкладке и заканчиваются на другой. Следовательно, свободные заряды, возникающие на разных обкладках, имеют одинаковую величину  $q$  и различны по знаку. Под емкостью конденсатора понимается физическая величина, пропорциональная заряду  $q$  и обратно пропорциональная разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (4.21)$$

Емкость конденсатора измеряется в тех же единицах, что и емкость уединенного проводника.

Величина емкости определяется геометрией конденсатора (формой и размерами обкладок, а также величиной зазора между ними), а также диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками. Найдем формулу для емкости плоского конденсатора. Если площадь обкладки  $S$ , а заряд на ней  $q$ , то напряженность поля между обкладками равна

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S} \quad (4.22)$$

Мы воспользовались формулой (3.3) из предыдущей лекции и учли возможность наличия диэлектрика в зазоре между пластинками.

Разность потенциалов, как известно, есть работа поля по перемещению единичного заряда. В однородном поле, когда напряженность во всех точках поля одинакова, эта работа будет равна произведению величины напряженности  $E$  на расстояние, на которое перемещается единичный заряд. Если расстояние между обкладками конденсатора равно  $d$ , то разность потенциалов, то есть напряжение между этими обкладками

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{qd}{\varepsilon\varepsilon_0 S} \quad (4.23)$$

откуда для емкости плоского конденсатора получается следующая формула:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad (4.24)$$

где  $S$  – площадь обкладки,  $d$  – величина зазора между обкладками,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего зазор.

Из формулы (4.24) следует, что размерность электрической постоянной  $\varepsilon_0$  равна размерности емкости, деленной на размерность длины (напомним, что  $\varepsilon$  – безразмерная величина). В соответствии с этим единицы, в которых измеряется  $\varepsilon_0$ , носят название «фарада на метр» (Ф/м).

Из выражения (4.24) ясно, почему введение между обкладками прослойки из сегнетоэлектрика (например, метатитаната бария) позволяет получить при небольших размерах конденсатора большую емкость.

Помимо емкости, каждый конденсатор характеризуется предельным напряжением  $U_{\max}$ , которое можно прикладывать к обкладкам конденсатора, не опасаясь его пробоя. При превышении этого напряжения между обкладками проскакивает искра, в результате чего разрушается диэлектрик и конденсатор выходит из строя.

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Какую молекулу называют полярной?
2. Какую молекулу называют неполярной?
3. Что называется диполем?
4. Что называют электрическим моментом диполя?
5. Как неполярные молекулы приобретают электрический момент?
6. Как связан электрический момент, приобретаемый неполярной молекулой в электрическом поле и напряженность этого поля?
7. Какую величину называют поляризуемостью молекулы?
8. Почему по отношению к неполярным молекулам применяют термин "упругий диполь"?
9. По отношению к каким молекулам применяется понятие "жесткий диполь"? Почему?
10. Приведите формулу, которая связывает момент пары сил, действующих на заряды диполя в электрическом поле, электрический момент диполя и напряженность электрического поля, вызывающего этот момент сил.
11. В каком направлении вращает диполь момент сил в электрическом поле?
12. Какой формулой можно выразить электрический момент единицы объема вещества диэлектрика в данной точке?
13. Какую величину называют вектором поляризации диэлектрика?
14. Каким образом связаны электрический момент единицы объема вещества диэлектрика и вектор поляризации диэлектрика?
15. Как в диэлектрике связаны вектор поляризации и вектор напряженности электрического поля в данной точке?
16. Какую величину называют диэлектрической восприимчивостью диэлектрика?
17. Поляризация диэлектрика приводит к усилению или ослаблению электрического поля?
18. По отношению к внешнему полю электрическое поле, возникающее вследствие поляризации диэлектрика, имеет направление:  
а) произвольное направление; б) под прямым углом;  
в) противоположное направление; г) то же направление, что и внешнее поле; д) электрическое поле вследствие поляризации диэлектрика не возникает?
19. Насколько, на какую величину ослабляется электрическое поле внутри диэлектрика вследствие его поляризации?

20. Как связаны векторы электрического смещения, напряженности и поляризации?
21. Как связаны векторы электрического смещения и напряженности в вакууме?
22. Каким образом величина электрического смещения от зависит от среды распространения электрического поля?
23. Зависит ли величина напряженности от свойств среды распространения электрического поля?
24. Запишите формулу, выражающую теорему Гаусса для вектора электрического смещения.
25. Сформулируйте теорему Гаусса для вектора электрического смещения.
26. Запишите формулу, выражающую теорему Гаусса для вектора электрического смещения в случае наличия объемного заряда.
27. Какую величину называют относительной диэлектрической проницаемостью?
28. Какую величину называют диэлектрической проницаемостью среды?
29. Какое соотношение связывает электрическое смещение, напряженность электрического поля и относительную диэлектрическую проницаемость среды?
30. Чему равна относительная диэлектрическая проницаемость вакуума?
31. Чему равна абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума? Чему она равна численно?
32. В каких пределах находится значение относительной диэлектрической проницаемости обычных диэлектриков в твердом состоянии?
33. Какие жидкости отличаются высокой относительной диэлектрической проницаемостью?
34. Сколько единиц составляет относительная диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды?
35. Как можно охарактеризовать величину относительной диэлектрической проницаемости газов?
36. Какое явление характерно для поляризации сегнетоэлектриков?
37. Какова диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков?
38. Нарисуйте зависимость величины поляризации от напряженности электрического поля для сегнетоэлектриков.
39. Что называют точкой Кюри для сегнетоэлектриков?
40. Назовите известные Вам вещества, относящиеся к сегнетоэлектрикам.
41. В чем состоит прямой пьезоэлектрический эффект?
42. В чем состоит обратный пьезоэлектрический эффект?
43. Назовите известные Вам вещества, относящиеся к пьезоэлектрикам.

44. В каком случае у пьезоэлектриков возникает резонанс?
45. Как на практике используются резонансные явления в пьезоэлектриках?
46. Какое вещество называют электрет?
47. Каковы условия равновесия зарядов в проводниках?
48. Насколько могут отличаться потенциалы различных точек поверхности заряженного проводника?
49. Как располагаются заряды внутри проводника?
50. Как располагаются заряды на поверхности проводника?
51. Как связаны напряженность поля вблизи поверхности проводника и поверхностная плотность заряда?
52. Где напряженность поля выше: на впадинах или на выступах заряженного тела из проводящего материала?
53. Что называют "электрическим ветром"?
54. Какой заряд называют "индуцированным"?
55. Где располагаются индуцированные заряды в теле из проводящего вещества?
56. Что называется электрической емкостью проводника?
57. Чему численно равна емкость?
58. В каких единицах измеряется емкость?
59. Какие дробные единицы измерения емкости Вам известны?
60. Какой формы обычно бывают конденсаторы?
61. Как рассчитывается емкость плоского конденсатора через его конструктивные параметры?
62. Почему использование сегнетоэлектриков позволяет создавать конденсаторы большой емкости?

### ***Уровень курса***

1. Полярные и неполярные молекулы диэлектрика. Диполь в однородном электрическом поле.
2. Поляризация диэлектриков.
3. Описание электрического поля в диэлектрике.
4. Сегнетоэлектрики и их свойства.
5. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.
6. Равновесие зарядов на проводнике.
7. Проводник во внешнем электрическом поле.
8. Электрическая емкость.
9. Конденсаторы.

## Лекція № 5

**Тема:** Природа магнетизма. Магнитное поле. Магнитные свойства веществ.

**Оглавление**

Магнитные явления и природа магнетизма .....	2
Магнитное поле .....	7
Взаимодействие токов .....	7
Магнитная индукция .....	8
Напряженность магнитного поля и закон полного тока.....	10
Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля ...	11
Магнитные свойства веществ .....	12
Подразделение веществ на сильномагнитные и слабомагнитные.	12
Основные характеристики ферромагнитных материалов .....	13
Потери, обусловленные гистерезисом.....	15
Магнитомягкие и магнитотвердые материалы .....	15
Контрольные вопросы по теме .....	17
Уровень модуля.....	17
Уровень курса.....	18

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.



## Магнитные явления и природа магнетизма

Магнитные свойства присущи всем без исключения окружающим телам. Магнетизм так же универсален, как земное притяжение и электричество. Однако не у всех тел это свойство проявляется в одинаковой степени. У подавляющего большинства тел магнитные свойства очень слабы. Можно указать два наиболее ярких проявления магнетизма.

Во-первых, это так называемые постоянные магниты, обычно изготовленные из железа или его сплавов и соединений, а также из некоторых других химических элементов - никеля, кобальта и редкоземельных элементов (лантаноидов), например, гадолиния. Во-вторых, проявление аналогичной силы можно увидеть, если взамен упомянутых постоянных магнитов взять проводники (или катушки из них - соленоиды), по которым протекает постоянный электрический ток. Рассмотрим два постоянных магнита из одинаковых массивных железных стержней (рис. 5.1.). Будем считать, что заштрихованный конец стержня имеет знак "+" и обозначен буквой N, а незаштрихованный конец - знак "-" и обозначен буквой S. Стержни, изображенные на рис. 5.1, направлены друг к другу одинаковыми знаками и буквами (+, N). Чтобы сблизить стержни, необходимо приложить усилия. На рис. 5.2, где стержни обращены друг к другу разными знаками и буквами (+, N и -, S), усилия направлены на то, чтобы не дать стержням соприкоснуться. Достаточно ослабить усилие, как в первом случае магнитные стержни разъедутся, а во втором - плотно соединятся.

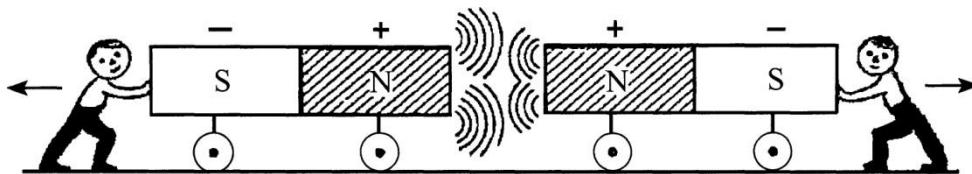


Рис. 5.1. Усилия при попытке сблизить одноименные концы постоянного магнита

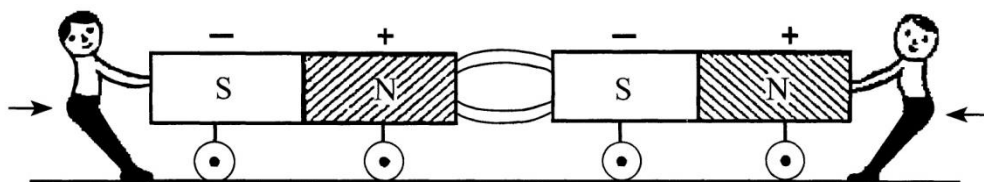


Рис. 5.2. Усилия при попытке удержать постоянные магниты, направленные друг к другу разноименными концами

Существует еще один наглядный способ обнаружения магнитного действия постоянных магнитов. Если около магнита поместить металлическую деталь, которая до приближения к магниту не проявляла

никаких магнитных действий, то вблизи постоянного магнита эта деталь сама становится магнитом. На стороне детали, обращенной к магниту, возникает состояние, при котором она всегда притягивается к магниту, подобно разноименным концам магнитных стержней (рис. 5.3).

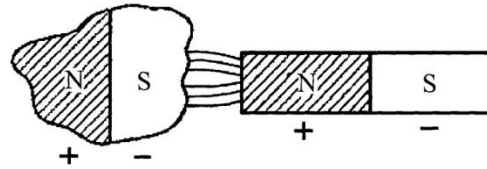


Рис. 5.3. Магнитоиндукционный эффект

Этот магнитоиндукционный эффект можно использовать для обнаружения в пространстве, окружающем магнит, его магнитного действия. На рис. 5.4, а показано проявление таких магнитных действий стержневым постоянным магнитом, полученное с помощью магнитных порошков. Частицы порошка (имея несколько удлиненную форму) выстраиваются вдоль линий, которые выходят из одного конца магнита и входят в другой его конец (рис. 5.4, б). Их принято называть линиями индукции, или магнитными силовыми линиями, поскольку именно вдоль них направлены силы (показаны на рис. 5.4, б стрелками), ориентирующие частицы магнитного порошка вокруг магнита.

Напомним, что концы магнитов называют полюсами. Если вблизи магнита нет других магнитов, каких-либо больших железных предметов или залежей магнитной руды, то подвешенный магнит всегда ориентируется почти точно вдоль географического меридиана с юга на север (рис. 5.5).

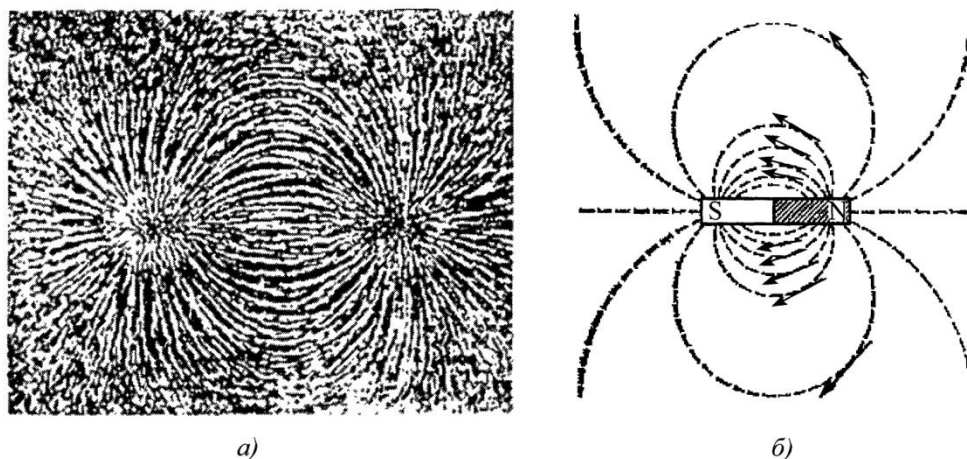


Рис.5.4. Картина линий индукции стержневого магнита, полученная с помощью магнитных порошков (а), и векторный характер магнитного поля (б)

Вокруг магнитов существует особая форма материи - магнитное поле. Это и есть тот материальный носитель, который передает взаимодействие между магнитами. Этот носитель передает взаимодействие и между электрическими токами.

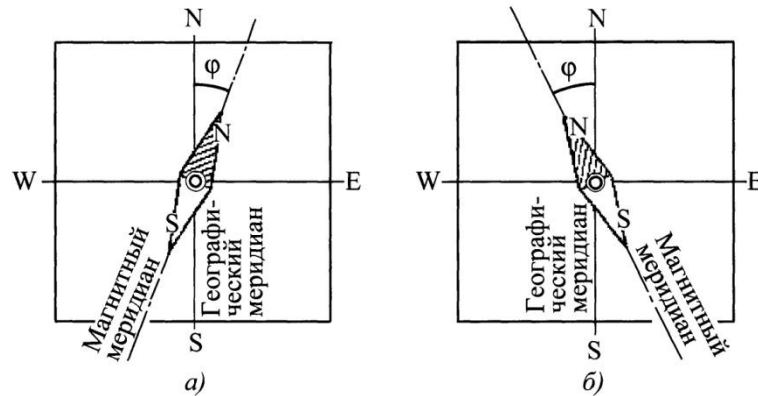


Рис. 5.5. Направление магнитной стрелки относительно географического меридиана в местах с восточным (а) и с западным (б) магнитным склонением ( $\varphi$  - угол склонения)

Существуют тела, которые могут притягиваться и отталкиваться от магнитов, не находясь при этом в непосредственном контакте с ними. Сила притяжения или отталкивания прямо пропорциональна расстоянию между магнитом и взаимодействующим с ним телом.

Некоторые тела вблизи магнита сами становятся ярко выраженными магнитами. Однако при удалении магнита они могут как сохранить, так и потерять это свойство. Сами исходные магниты также могут утратить свои магнитные свойства, например, если нагреть их выше определенной температуры, а потом охладить без присутствия других магнитов поблизости, или же подвергнуть их сильным механическим ударам. Восстановить магнитные свойства, утерянные при нагревании, можно путем охлаждения вблизи другого магнита или с помощью воздействия постоянных электрических токов, протекающих по проводам или соленоидам, а потерянные при ударах - теми же способами даже без охлаждения.

На направление стрелки компаса влияют не только магнитное поле Земли или поле постоянных магнитов, но и электрические токи (рис. 5.6). Это впервые в 1820 г. обнаружил датский физик Ханс Кристиан Эрстед.

Вокруг проводника с током, как и вокруг постоянного магнита, возникает магнитное поле. Это можно подтвердить с помощью частиц магнитного порошка, которые "нарисуют" линии индукции магнитного поля электрических токов.

На рис. 5.7 приведены хорошо известные картины линий индукции магнитных полей прямого и кругового токов, а также соленоида, полученные с помощью железных опилок. Хотя эти картины и похожи на аналогичные картины для постоянных магнитов, но есть и некоторые различия.

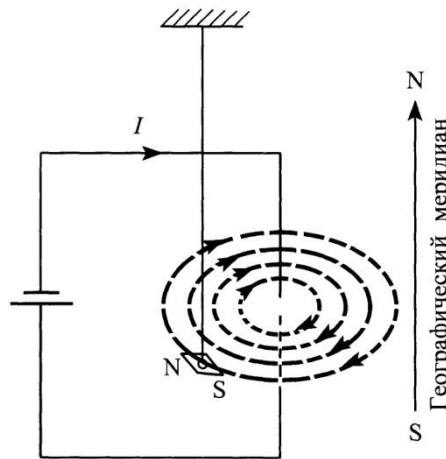


Рис. 5.6. Направление магнитной стрелки около прямого проводника с электрическим током  $I$  (открытие Эрстеда)

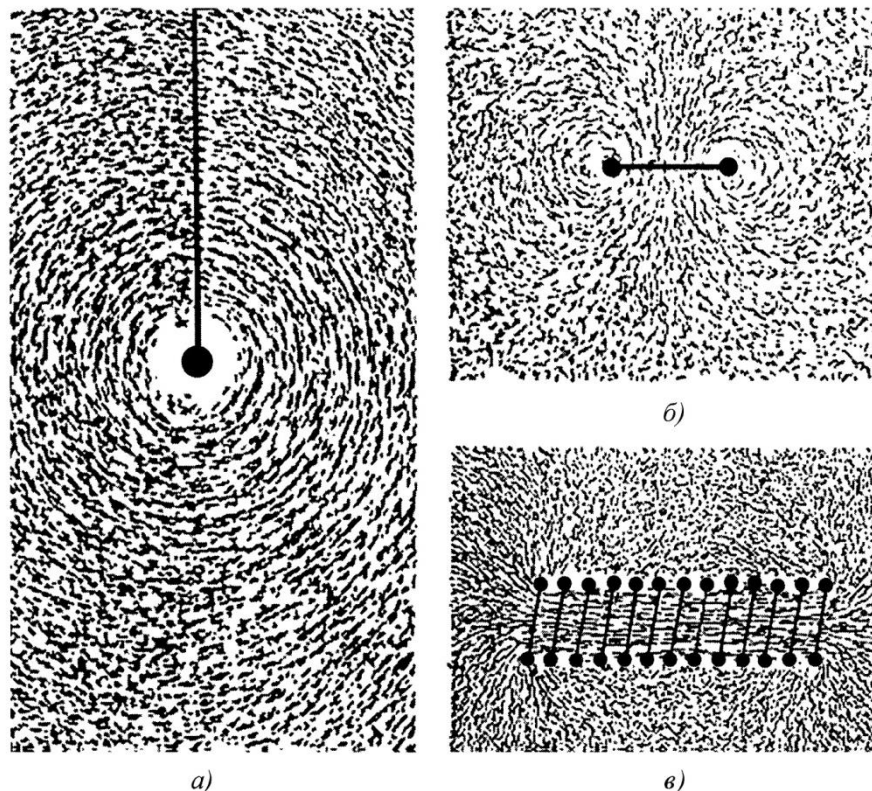


Рис. 5.7. Картины линий индукции магнитных полей, полученные с помощью магнитного порошка: а - для прямого тока; б - для замкнутого кругового тока; в - для соленоида с током

Сравним картины линий индукции стержневого магнита и соленоида (см. рис. 5.4, а и рис. 5.7, в). Если исключить внутреннюю часть последнего, то картины поля совершенно подобны. Однако у соленоида силовые линии в отличие от магнита не имеют ни начала, ни конца - они всегда замкнуты как у прямого, так и кругового проводника.

Французский физик Ампер еще в 20-х годах XIX столетия, сразу после опытов Эрстеда, выдвинул гипотезу о молекулярных токах: электрические токи могут быть не только макроскопическими, когда они текут по большим (по сравнению с размерами атомов) проводам, но и микроскопическими, протекающими в пределах одного атома или молекулы. Таким образом, в каждом теле имеется огромное число замкнутых молекулярных токов. Каждый из них создает вокруг себя магнитное поле, подобное полю замкнутого кругового тока (см. рис. 5.7, б).

В большинстве тел, когда на них не действуют никакие внешние ориентирующие силы, тепловое хаотическое движение все время меняет направление молекулярных токов, и поэтому наиболее вероятно, что в среднем магнитные поля этих токов не складываются в одно результирующее поле, а дают в сумме нулевой эффект. На рис. 5.8, а показано беспорядочное распределение ориентации молекулярных токов в теле, "скрывающее" его магнетизм. Постоянные магниты отличаются от других тел только тем, что в них по определенным причинам молекулярные токи ориентированы упорядоченно - параллельно (рис. 5.8, б) и поэтому дают вполне заметный суммарный магнитный эффект во внешнем пространстве.

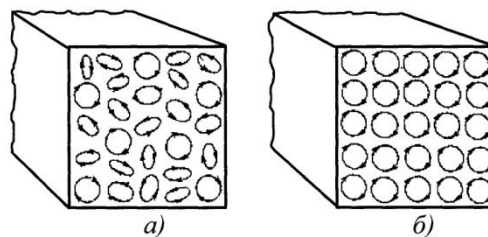


Рис. 5.8. Микроскопические (молекулярные) замкнутые токи в постоянном магните: а - при беспорядочном распределении (гипотеза Ампера); б - при упорядоченном распределении

Если в телах нет внутренних, закрепляющих параллельную ориентацию, взаимодействий между молекулярными токами, то такая ориентация с тем или иным эффектом может быть обусловлена только влиянием внешнего магнитного поля, например, поля постоянного магнита или соленоида с током.

Гипотеза Ампера о молекулярных токах сначала была лишь гениальной догадкой. Только в конце XIX - начале XX веков, когда был открыт электрон,

когда была предсказана и получила опытное подтверждение ядерная структура атомов, эта гипотеза нашла полное экспериментальное и теоретическое обоснование.

Ампер дал "токовую" интерпретацию магнитным взаимодействиям. Она связана с теоремой об эквивалентности магнитных полей, создаваемых электрическими токами и постоянными магнитами (теорема Ампера).

## Магнитное поле

---

### *Взаимодействие токов*

Электрические токи взаимодействуют между собой. Например, два тонких прямолинейных параллельных проводника, по которым текут токи (мы будем называть их прямыми токами), притягивают друг друга, если токи в них имеют одинаковое направление, и отталкивают друг друга, если их направления противоположны.

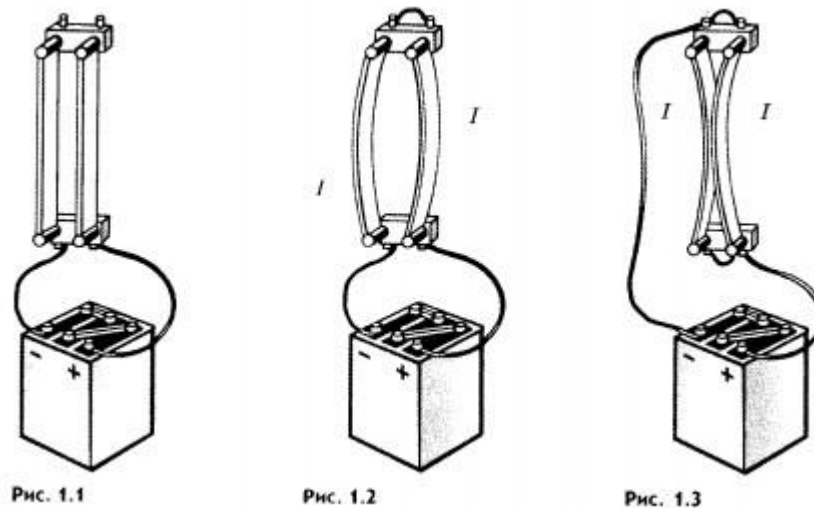


Рис 5.9

Взаимодействие токов осуществляется через поле, которое называется магнитным. Это название происходит от того, что, как обнаружил Эрстед, поле, создаваемое током, оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку.

Итак, движущиеся заряды (токи) изменяют свойства окружающего их пространства — создают в нем магнитное поле. Это поле проявляется в том, что на движущиеся в нем заряды (токи) действуют силы.

## Магнитная индукция

**Силовой характеристикой** магнитного поля является *магнитная индукция*, которую обычно обозначают латинской буквой  $B$  или  $\vec{B}$  – когда необходимо указать ее векторную природу. Магнитная индукция  $\vec{B}$  – это векторная величина, определяемая по силовому воздействию магнитного поля на ток. Одним из основных проявлений магнитного поля является его силовое воздействие на проводник с током, помещенный в это поле. Опыт показывает, что сила  $\vec{F}$ , с которой магнитное поле действует на элемент проводника длиной  $d\vec{l}$  с током  $I$ , определяется векторным произведением:

$$\vec{F} = I [d\vec{l} \vec{B}] \quad (5.1)$$

Эта сила направлена перпендикулярно индукции в данной точке поля и перпендикулярна элементу тока  $I d\vec{l}$  (рис. 5.10).

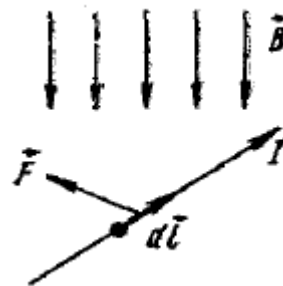


Рис. 5.10

В международной системе единиц СИ единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл):  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 1 \text{ Вб} / \text{м}^2$ .

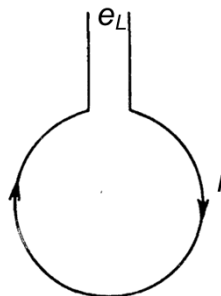


Рис. 5.11

Еще одним проявлением силовых свойств магнитного поля является явление электромагнитной индукции, которое было рассмотрено в лекции №7. Электромагнитной индукцией называется возникновения эдс в контуре при пересечении его магнитным полем. Под контуром понимается незамкнутый виток провода, имеющий форму петли (Рис. 5.11).

Индуктируемая в контуре внешним магнитным полем электродвижущая сила  $e$  определяется по формуле:

$$e_L = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (5.2)$$

Здесь  $\Phi$  – это магнитный поток, пронизывающий контур:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (5.3)$$

В случае плоского контура и неизменной в пределах этого контура величине магнитной индукции магнитный поток  $\Phi$  прямо пропорционален величине магнитной индукции  $B$  в данной точке магнитного поля, площади контура  $S$  и косинусу угла между вектором  $\vec{B}$  и нормалью к плоскости контура (рис. 5.12):

$$\Phi = \vec{B}\vec{S} = B \cdot S \cos \alpha \quad (5.4)$$

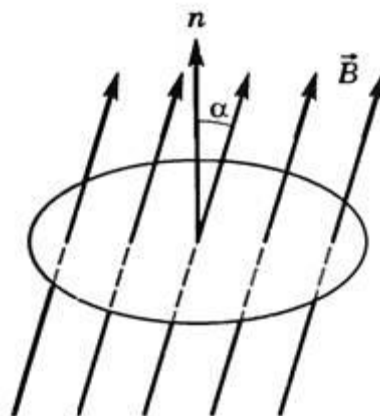


Рис. 5.12

Очевидно, что магнитный поток через контур имеет максимальное значение, когда магнитная индукция направлена перпендикулярно плоскости контура (то есть, когда  $\alpha = 0$ ).

ЭДС индукции, наводимая внешним магнитным полем, пропорциональна **скорости изменения магнитного потока**. Знак минус в правой части формулы (5.2) обусловлен принципом Ленца, определяющим направление индуктивной эдс: «эдс направлена так, что своим действием препятствует причине, вызвавшей её появление».

**Закон Ленца:** эдс, наводимая в контуре изменяющимся магнитным потоком, всегда стремится вызвать ток, направленный так, чтобы воспрепятствовать изменению магнитного потока.



Если площадь контура неизменна, и угол  $\alpha$  не меняется, то ЭДС, наводимая в контуре магнитным полем, оказывается пропорциональна скорости изменения магнитной индукции  $B$ , которая, как уже было сказано ранее, является силовой характеристики поля.

### **Напряженность магнитного поля и закон полного тока**

Другой характеристикой магнитного поля является его *напряженность*. Магнитное поле в каждой точке характеризуется вектором *напряженности*  $H$ , величина которого измеряется в А/м. Напряженность характеризует связь параметров поля с величиной источника поля. Как было указано выше, источником магнитного поля является электрический ток.

Магнитное поле создается электрическими токами. Количественная связь между линейным интегралом от вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  вдоль любого произвольного контура и алгебраической суммой токов  $\sum I$ , охваченных этим контуром, определяется **законом полного тока**:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I \quad (5.5)$$

Данная формула иллюстрируется следующим рисунком.

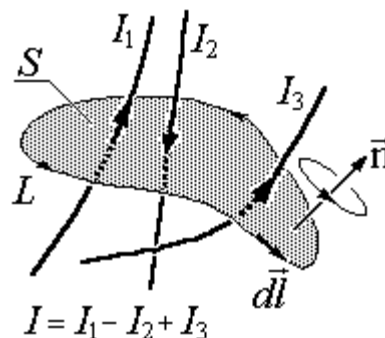


Рис. 5.13

Положительное направление интегрирования связано с положительным направлением тока  $I$  правилом правого винта. Если контур интегрирования будет пронизывать катушку с числом витков  $w$  (синий контур L1 на рис.5.14), по которой проходит ток  $I$ , то  $\sum I = Iw$  и  $\oint \vec{H} d\vec{l} = Iw$ .

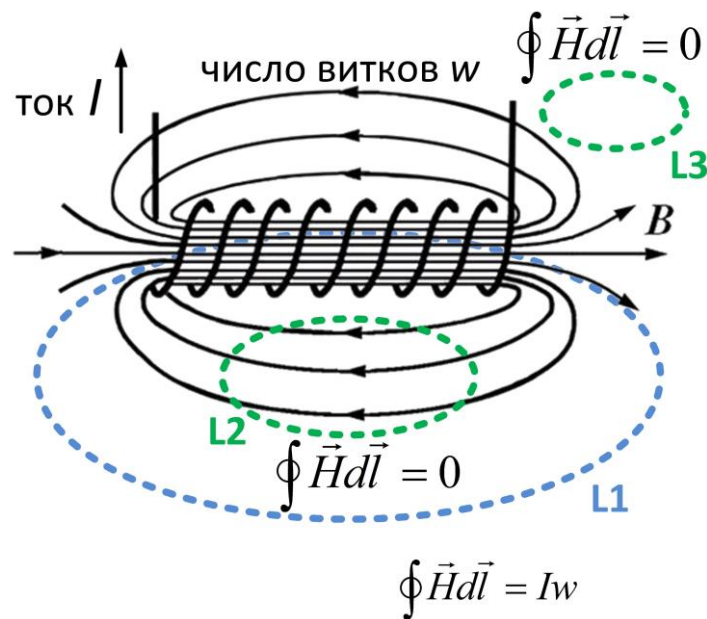


Рис. 5.14

Если контур интегрирования не охватывает ни одного витка катушки (зеленые контура L2 и L3), ни одного провода, по которому протекает электрический ток, то в этом случае:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = 0 \quad (5.6)$$

Разумеется, этот интеграл  $\oint \vec{H} d\vec{l}$  также равен нулю всегда, когда по катушке не пропускается ток, то есть когда  $I=0$ , даже если интегрирование идет по контуру L1.

### **Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля**

Итак, напряженность магнитного поля  $H$  показывает **причину** появления магнитного поля: почему оно возникает? Эта характеристика отражает связь с источником возникновения магнитного поля – с электрическим током (формула (5.5)). А вот магнитная индукция  $B$  отражает силовые свойства поля. Она показывает, с какой силой данное магнитное поле действует на провод с током, помещенный в это поле (формула (5.1)). То есть, магнитная индукция указывает на **последствия** наличия магнитного поля: на то, как оно проявляется, как можно его обнаружить?

Существует ли связь между этими двумя характеристиками: напряженностью и магнитной индукцией?

Да. Если мы рассматриваем магнитное поле в вакууме, то обе эти характеристики фактически представляют собой одну и ту же величину:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (5.7)$$

Они отличаются только масштабным коэффициентом, который зависит от выбранной системы единиц. Можно подобрать такую систему единиц, при которой напряженность и магнитная индукция будут полностью совпадать. В применяемой нами международной системе единиц СИ  $B$  и  $H$  связаны через коэффициент  $\mu_0$ , который носит название *магнитная постоянная*, она равна:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \quad (5.8)$$

Казалось бы, зачем тогда вводить две характеристики магнитного поля вместо одной? Все дело в том, что для веществ равенство (5.7) не соблюдается. Если магнитное поле распространяется не в вакууме, а внутри вещества: внутри газа (например, воздух), внутри жидкости (например, вода) или внутри твердого тела (например, дерево или железо), – то вместо формулы (5.7) необходимо пользоваться другой формулой:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (5.9)$$

И, здесь, как видите, появляется еще один коэффициент, обозначаемый  $\mu$ , и имеющий название *относительная магнитная проницаемость*. Относительная магнитная проницаемость разная для разных веществ. Соответственно, разной для разных веществ является и *абсолютная магнитная проницаемость*

$$\mu_a = \mu_0 \mu \quad (5.10)$$

С использованием абсолютной магнитной проницаемости формула (5.9) может быть переписана следующим образом:

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} \quad (5.11)$$

## Магнитные свойства веществ

---

### **Подразделение веществ на сильномагнитные и слабомагнитные**

Из курса физики известно, что вещества по их магнитным свойствам подразделяют на диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные. У диамагнитных веществ относительная магнитная проницаемость практически не отличается от единицы, но все же несколько меньше единицы  $\mu < 1$ , например, для висмута = 0,99983. У парамагнитных веществ  $\mu > 1$ , однако также в очень небольшой степени. Например для платины = 1,00036. У ферромагнитных веществ (железо, кобальт и их сплавы)  $\mu$  много больше единицы (например,  $10^4$ , а у некоторых материалов даже до  $10^6$ ). При решении большинства электротехнических задач достаточно подразделять все

вещества не на перечисленные группы, а на сильномагнитные (или даже просто магнитные), у которых  $\mu \gg 1$ , и на слабомагнитные (немагнитные), у которых относительная магнитная проницаемость практически не отличается от единицы  $\mu \approx 1$ .

### **Основные характеристики ферромагнитных материалов**

Свойства ферромагнитных материалов принято характеризовать зависимостью магнитной индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ . Различают два основных типа этих зависимостей: кривые намагничивания и гистерезисные петли.

Под кривыми намагничивания понимают однозначную зависимость между  $B$  и  $H$ . Кривые намагничивания подразделяют на начальную, основную и безгистерезисную (что будет пояснено далее).

Из курса физики известно, что ферромагнитным материалам присуще явление гистерезиса – отставание изменения магнитной индукции  $B$  от изменения напряженности магнитного поля  $H$ . Он обусловлен необратимыми изменениями энергетического состояния под действием внешнего поля  $H$ . При периодическом изменении напряженности поля зависимость между  $B$  и  $H$  приобретает петлевой характер.

Различают несколько типов гистерезисных петель – симметричную, предельную и несимметричную (частный цикл).

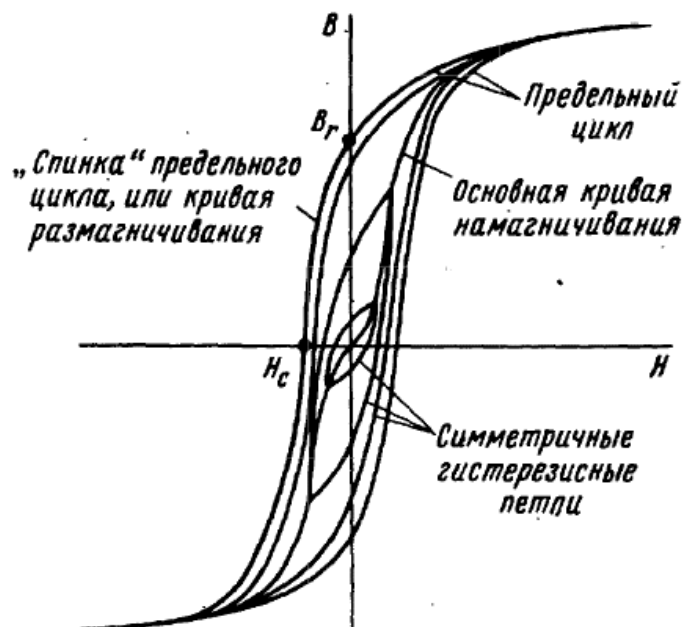


Рис. 5.15

На рис. 5.15 зображено сімейство симетричних гистерезисних петель. Для кожної симетричної петлі максимальне позитивне

значение  $B$  равно максимальному отрицательному значению  $B$  и соответственно  $H_{max} = |-H_{max}|$ .

Геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель называют *основной кривой намагничивания*. При очень больших  $H$  вблизи  $\pm H_{max}$  восходящая и нисходящая ветви гистерезисной петли практически сливаются.

*Предельной гистерезисной петлей* или *предельным циклом* называют симметричную гистерезисную петлю, снятую при очень больших  $H_{max}$ . Индукцию при  $H = 0$  называют *остаточной индукцией* и обозначают  $B_r$ .

Напряженность поля при  $B=0$  называют *задерживающей* или *коэрцитивной силой* и обозначают  $H_c$ .

Участок предельного цикла  $B_r H_c$  (рис. 5.15) принято называть кривой размагничивания или «спинкой» гистерезисной петли.

Этот участок используют при расчетах магнитных цепей с постоянными магнитами и магнитных элементов запоминающих устройств вычислительной техники.

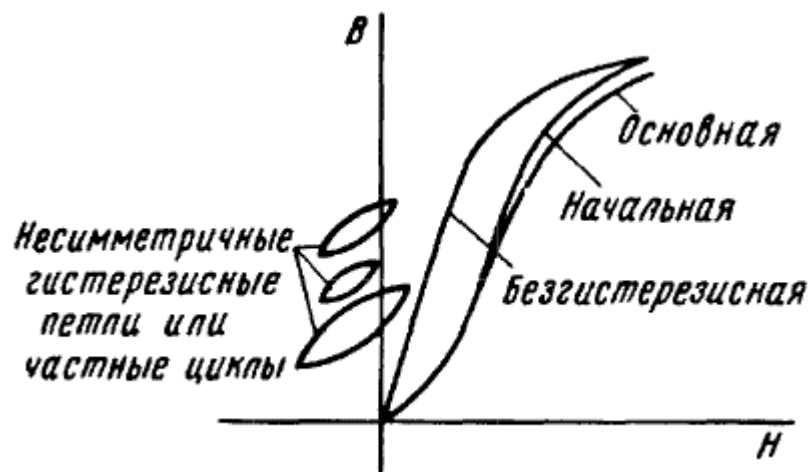


Рис. 5.16

Если изменять  $H$  периодически и так, что  $+H_{max} \neq |-H_{max}|$ , то зависимость между  $B$  и  $H$  будет иметь вид петли, но центр петли не совпадает с началом координат (рис. 5.16). Такие гистерезисные петли называют частными петлями гистерезиса или частными циклами.

Когда предварительно размагниченный ферромагнитный материал ( $B=0$ ,  $H=0$ ) намагничивают, монотонно увеличивая  $H$ , получаемую зависимость между  $B$  и  $H$  называют начальной кривой намагничивания.

Начальная и основная кривые намагничивания настолько близко расположены друг к другу, что практически во многих случаях их можно считать совпадающими (рис. 5.15).

Безгистерезисной кривой намагничивания называют зависимость между  $B$  и  $H$ , возникающую, когда при намагничивании ферромагнитного материала его периодически постукивают или воздействуют на него полем, имеющим кроме постоянной составляющей еще и затухающую по амплитуде синусоидальную составляющую. При этом гистерезис как бы снимается.

Безгистерезисная кривая намагничивания резко отличается от основной кривой.

В различных справочниках, а также в стандартах в качестве однозначной зависимости между  $B$  и  $H$  дается основная кривая намагничивания.

### **Потери, обусловленные гистерезисом**

При периодическом перемагничивании ферромагнитного материала в нем совершаются необратимые процессы, на которые расходуется энергия от намагничивающего источника. В общем случае потери в ферромагнитном сердечнике обусловлены гистерезисом, макроскопическими вихревыми токами и магнитной вязкостью. Степень проявления различных видов потерь зависит от скорости перемагничивания ферромагнитного материала. Если сердечник перемагничивается во времени замедленно, то потери в сердечнике обусловлены практически только гистерезисом (потери от макроскопических вихревых токов и магнитной вязкости при этом стремятся к нулю).

Площадь гистерезисной петли  $\oint HdB$  характеризует энергию, выделяющуюся в единице объема ферромагнитного вещества за один цикл перемагничивания.

Если ферромагнитный сердечник подвергается периодическому намагничиванию (например, в цепях переменного тока), то для уменьшения потерь на гистерезис в нем он должен быть выполнен из магнитомягкого материала.

### **Магнитомягкие и магнитотвердые материалы**

По величине коэрцитивной силы ферромагнитные материалы подразделяют на магнитомягкие и магнитотвердые. Материалы, у которых  $H_c < 4$  кА/м, относятся к магнитомягким, у которых  $H_c > 4$  кА/м – к магнитотвердым

Магнитомягкие материалы обладают круто поднимающейся основной кривой намагничивания и относительно малыми площадями гистерезисных петель. Их применяют во всех устройствах, которые работают или могут работать при периодически изменяющемся магнитном потоке (трансформаторах, электрических двигателях и генераторах, индуктивных катушках и т. п.).

Некоторые магнитомягкие материалы, например перминвар, сплавы 68НМП и др., обладают петлей гистерезиса по форме, близкой к прямоугольной (рис. 5.17,а). Такие материалы получили распространение в энергетике, радиотехнике и устройствах автоматики.

В группу магнитомягких материалов входят электротехнические стали, железоникелевые сплавы типа пермаллоя и др.

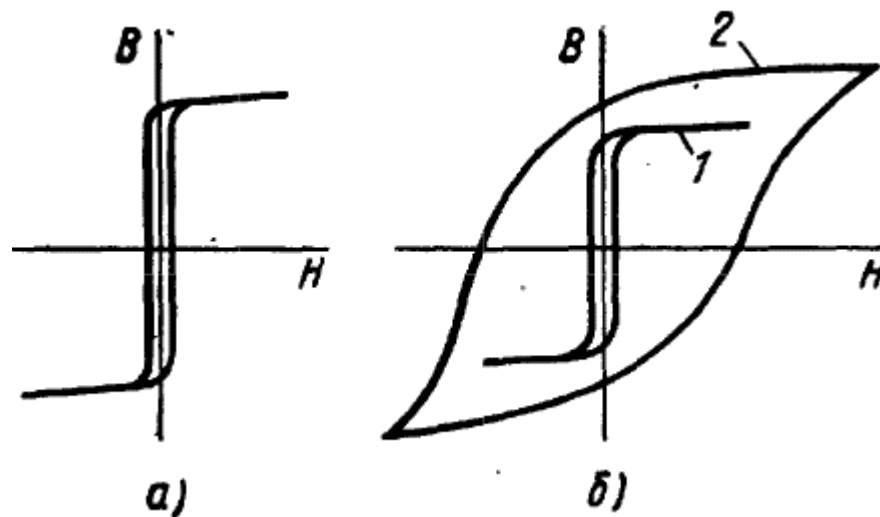


Рис 5.17

Магнитотвердые материалы обладают полого поднимающейся основной кривой намагничивания и большой площадью гистерезисной петли. В группу магнитотвердых материалов входят углеродистые стали, сплавы магнито, вольфрамовые, платинокобальтовые сплавы и сплавы на основе редкоземельных элементов, например самарийкобальтовые. У последних  $B_r \approx 0,9$  Тл и  $H_c = 660$  кА/м.

На рис. 5.17, б качественно сопоставлены гистерезисные петли для магнитомягкого материала типа пермаллоя (кривая 1) и для магнитотвердого материала (кривая 2).

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. В чем, по гипотезе Ампера, причина возникновения магнитных явлений?
2. В чем проявляется взаимодействие токов при их протекании по параллельным проводникам?
3. Как называется поле, через которое происходит взаимодействие токов?
4. Как называется силовая характеристика магнитного поля?
5. Как связаны сила  $\vec{F}$ , с которой магнитное поле действует на элемент проводника длиной  $d\vec{l}$  с током  $I$ , и индукция этого магнитного поля?
6. В каких единицах измеряется магнитная индукция?
7. Как связана эдс, индуцируемая магнитным полем в контуре, и магнитный поток пронизывающий этот контур?
8. Что такое магнитный поток?
9. При каких условиях магнитный поток через контур имеет максимальное значение?
10. Сформулируйте закон Ленца.
11. В каких единицах измеряется напряженность магнитного поля?
12. Запишите формулу, выражающую закон полного тока.
13. Если контур интегрирования не охватывает ни одного провода с током, то чему будет равен интеграл от напряженности магнитного поля по этому контуру?
14. Как связаны величины магнитной индукции и напряженности магнитного поля в вакууме?
15. Как называется коэффициент  $\mu_0$  в формуле, связывающей магнитную индукцию и напряженность магнитного поля в вакууме?
16. Как связаны величины магнитной индукции и напряженности магнитного поля в веществе?
17. Как связаны абсолютная и относительная магнитные проницаемости?
18. На какие три группы подразделяют вещества по их магнитным свойствам?
19. Какие вещества называют диамагнитными?
20. Какие вещества называют парамагнитными?
21. Какие вещества называют ферромагнитными?
22. Какие два основных типа зависимостей индукции от напряженности характеризуют магнитные свойства материалов?



23. Какие виды кривых намагничивания Вам известны?
24. Какие существуют типы гистерезисных петель?
25. Что называют основной кривой намагничивания?
26. Что называют предельной гистерезисной петлей?
27. Что называют остаточной индукцией?
28. Что называют коэрцитивной силой?
29. Что называют начальной кривой намагничивания?
30. Какую кривую намагничивания ферромагнитных материалов приводят в справочниках и стандартах?
31. В каких материалах потери на гистерезис больше: в материалах с широкой петлей гистерезиса или в материалах с узкой петлей гистерезиса?
32. По величине какого параметра различают магнитомягкие и магнитотвердые материалы?
33. Какие материалы называют магнитомягкими?
34. Какие материалы называют магнитотвердыми?
35. В каких случаях применяют магнитомягкие материалы?
36. В каких случаях применяют магнитотвердые материалы?

### ***Уровень курса***

1. Магнитные явления и природа магнетизма.
2. Магнитное поле.
3. Магнитная индукция.
4. Напряженность магнитного поля и закон полного тока.
5. Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля.
6. Основные характеристики ферромагнитных материалов: кривые намагничивания и гистерезисные петли.
7. Деление веществ на диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные.
8. Деление ферромагнитных веществ на магнитомягкие и магнитотвердые.

## Лекція № 6

**Тема:** Электромагнитное поле. Уравнения Максвелла.

**Оглавление**

Электромагнитное поле.....	3
Формулы для статических электрических и магнитных полей .....	4
Связь напряженности и смещения в электрическом поле.....	4
Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля .....	4
Теорема Гаусса.....	4
Закон полного тока .....	5
Закон электромагнитной индукции .....	5
Дивергенция и ротор.....	5
Новые уравнения.....	6
Закона Ома в дифференциальной форме.....	6
Теорема Гаусса .....	6
Магнитные заряды .....	7
Закон полного тока .....	7
Закон электромагнитной индукции .....	8
Уравнения Максвелла.....	9
Контрольные вопросы по теме .....	11
Уровень модуля.....	11
Уровень курса.....	11

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Электромагнитное поле

---

Согласно идеям Максвелла переменное магнитное поле всегда связано с порождаемым им электрическим полем, в свою очередь переменное электрическое поле всегда связано с порождаемым им магнитным. Таким образом, электрическое и магнитное поля оказываются неразрывно связанными друг с другом — они образуют единое электромагнитное поле.

Согласно принципу относительности, сформулированному Эйнштейном, законы всех физических явлений, в том числе и электромагнитных, имеют одинаковый вид (т. е. описываются одинаковыми уравнениями) во всех инерциальных системах отсчета. Из принципа относительности вытекает, что раздельное рассмотрение электрического и магнитного полей имеет лишь относительный смысл. Действительно, электростатическое поле создается системой неподвижных зарядов. Однако, если заряды неподвижны относительно некоторой инерциальной системы отсчета, то относительно других инерциальных систем эти заряды движутся и, следовательно, будут порождать не только электрическое, но и магнитное поле (движущийся заряд эквивалентен току). Неподвижный провод с постоянным током создает в каждой точке пространства постоянное магнитное поле. Однако относительно других инерциальных систем этот провод находится в движении. Поэтому создаваемое им магнитное поле в любой другой инерциальной системе, движущейся относительно рассматриваемой системы, будет меняться и, следовательно, порождать вихревое электрическое поле. Таким образом, поле, которое относительно некоторой системы отсчета оказывается «чисто» электрическим или «чисто» магнитным, относительно других систем отсчета будет представлять собой совокупность электрического и магнитного полей.

В данной лекции будут рассмотрены уравнения электромагнитного поля, сформулированные Максвеллом, в так называемой дифференциальной форме. Дифференциальной называется такая форма, когда уравнения представляют описание в одной, отдельно взятой точке пространства. Для такого описания необходимо применять дифференциальные уравнения, отчего название этой формы уравнений и носит название "дифференциальной". Такое описание отличается от описания с применением интегралов. Интегралы не описывают процесс в одной точке. Интеграл всегда применяется к какой части пространства, состоящего из бесконечного числа точек. Если мы рассматриваем функцию от одной пространственной переменной (например, от расстояния), то частью пространства (в данном случае одномерного), на которой рассчитывается интеграл, будет некоторый интервал. Если функция от двух переменных, то интеграл рассчитывается по

площади. Если от трех переменных – то по объему. Однако, в любом случае, если мы описываем некоторую изменяющуюся во времени функцию (а в нашем случае это электромагнитное поле) при помощи интегралов, то это описание охватывает некоторое пространство, состоящее из бесконечного числа точек. Мы же будем рассматривать поле в одной, отдельно взятой точке. И дифференциальные уравнения, которыми мы будем пользоваться, они все относятся именно к этой точке электромагнитного поля.

Для того, чтобы прийти к уравнениям Максвелла, мы воспользуемся теми соотношениями, уравнениями, теоремами и законами, которые были рассмотрены в предыдущих лекциях. Перечислим и напомним эти выражения в следующем разделе, где приводится только их краткое представление. Обращаем внимание, что известные нам уравнения приведены в интегральной форме. Нам необходимо будет перевести их в дифференциальную форму, для чего мы воспользуемся такими понятиями как дивергенция и ротор.

### **Уравнения статического электрического и магнитного полей**

---

#### ***Связь напряженности и смещения в электрическом поле***

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \quad (6.1)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость.

#### ***Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля***

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (6.2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость.

#### ***Теорема Гаусса***

Величина смещения напрямую связана с зарядом, который продуцирует это электрическое поле. Формула (6.3) выражает **теорему Гаусса** для вектора электрического смещения: *поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности свободных зарядов.*

$$\iint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum q_i \quad (6.3)$$

Если свободные заряды распределены внутри замкнутой поверхности непрерывно с объемной плотностью  $\rho$ , то формула (6.3) видоизменяется следующим образом:

$$\iint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum \iiint_V \rho dV \quad (6.4)$$

### Закон полного тока

Магнитное поле создается электрическими токами. Количественная связь между линейным интегралом от вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  вдоль любого произвольного контура и алгебраической суммой токов  $\sum I$ , охваченных этим контуром, определяется *законом полного тока*:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I \quad (6.5)$$

### Закон электромагнитной индукции

Закон электромагнитной индукции выражает явление, демонстрирующее, что магнитное поле и электрическое поле связаны. В частности, при изменении потока магнитной индукции через некоторый контур в контуре возникает ЭДС. Индуцируемая в контуре внешним магнитным полем электродвижущая сила  $e$  определяется по формуле:

$$e_L = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (6.6)$$

Здесь  $\Phi$  – это магнитный поток, пронизывающий контур:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (6.7)$$

### Дивергенция и ротор

Как видно, описание поля производится интегральными выражениями. Интегралы берутся по замкнутой поверхности, охватывающей некоторый объем, или по контуру, охватывающему некоторый контур, площадь. Если же рассматривать поле в каждой его точке, то необходимо описывать поле величинами, которые представляют собой предельное значение при стремлении этих объемов, поверхностей и контуров в точку. Для подобного описания используются математические операторы "дивергенция" и "ротор".

*Дивергенция* представляет собой предел отношения потока вектора через замкнутую поверхность к объему, охватываемому этой поверхностью, при стремлении объема в точку:

$$\operatorname{div} \vec{A} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Phi_{\vec{A}}}{V} \quad (6.8)$$

где  $\Phi_{\vec{A}}$  – поток вектора  $A$  через замкнутую поверхность  $S$ , которая охватывает объем  $V$ ,

$$\Phi = \iint_S \vec{A} d\vec{S} \quad (6.9)$$

*Ротор* векторного поля  $rot \vec{A}$  есть вектор, проекция которого  $rot_n \vec{A}$  на каждое направление  $\vec{n}$  есть предел отношения циркуляции векторного поля по контуру  $L$ , являющемуся краем плоской площадки  $S$ , перпендикулярной этому направлению, к величине этой площадки, когда размеры площадки стремятся к нулю, а сама площадка стягивается в точку:

$$rot \vec{A} = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\int \vec{A} d\vec{l}}{S} \quad (6.10)$$

Направление обхода контура определяется "правилом буравчика".

### Уравнения поля в дифференциальной форме

---

#### **Закона Ома в дифференциальной форме**

В первую очередь, добавим к приведенным выше уравнениям формулу закона Ома в дифференциальной форме, то есть в форме, которая отражает свойства среды в отдельной точке пространства:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (6.11)$$

где  $\vec{j}$  – вектор плотности тока,

$\sigma$  – удельная проводимость

$\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля.

#### **Теорема Гаусса**

Если проводить описание поля в каждой его точке и воспользоваться понятием дивергенции, то теорему Гаусса (6.4) следует переписать в таком виде

$$div \vec{D} = \rho \quad (6.12)$$

Данное выражения следует из того, что, если равенство (6.4) и слева и справа поделить на  $V$ , а после этого устремить объем  $V$  (соответственно – площадь  $S$ , которая охватывает объем  $V$ ) в точку, то слева в соответствии с (6.8) и (6.9) получаем дивергенцию вектора смещения  $\vec{D}$  в данной точке, а справа – просто объемную плотность заряда  $\rho$  в данной точке.

Полученное выражение (6.12) означает, что электрическое поле порождается электрическими зарядами, как бы "вытекает" из зарядов. По

существо, дивергенция – это поток вектора  $\vec{D}$  через бесконечно малую поверхность, окружающую точку, и если в данной точке нет электрических зарядов (плотность зарядов равна нулю), то и поток электрического смещения (следовательно, и напряженности электрического поля) через бесконечно малую поверхность, окружающую данную точку, будет равен нулю. То есть: источником электрического поля является электрический заряд. В этом физический смысл формулы (6.12)

### **Магнитные заряды**

Мы знаем, что магнитных зарядов в природе не существует (по крайней мере, они не открыты). Источником магнитного поля является электрический ток. Если это так, то дивергенция магнитной индукции в любой точке поля равна нулю:

$$\operatorname{div}\vec{B}=0 \quad (6.13)$$

Таким образом, физический смысл формулы (6.13) состоит в том, магнитных зарядов в природе не существует, а магнитное поле порождается не зарядами. Магнитное поле не вытекает из некоторой точки и никуда не уходит (в отличие от электрического). Линии магнитной индукции всегда замкнуты, у них нет ни начала ни конца. Напомним, что линии напряженности статического, постоянного электрического поля всегда начинаются на положительных зарядах и всегда заканчиваются на отрицательных зарядах. Если в пределах видимости имеем только один заряд, то где-то в бесконечности обязательно существует противоположный ему заряд. И тогда линии напряженности либо начинаются, либо заканчиваются в бесконечности.

### **Закон полного тока**

Источником магнитного поля является электрический ток – движение зарядов. Связь циркуляции вектора напряженности магнитного поля по некоторому контуру с током, который охватывается этим контуром, определяется законом полного тока (6.5). Если перейти к дифференциальной форме, то есть к рассмотрению поля в некоторой точке, то циркуляцию в выражении (6.5) для статического магнитного поля следует заменить на ротор (6.10). Справа же будет не какой-то ток, ток в общем, а плотность тока – вектор плотности тока  $\vec{j}$  в данной конкретной точке поля.

$$\operatorname{rot}\vec{H}=\vec{j} \quad (6.14)$$



По отношению к точке можно говорить только о плотности тока, то есть точно так, как рассматривается это явление в дифференциальной форме закона Ома.

Однако, полученное из уравнений статического магнитного поля выражение, как указал Максвелл, необходимо дополнить еще одной составляющей, которая отражает динамическую связь между двумя полями, электрическим и магнитным:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (6.15)$$

Последнее выражение описывает связь электрического и магнитного поля в динамике – при изменении во времени того и другого, когда эти два поля превращаются в единое целое – электромагнитное поле.

### ***Закон электромагнитной индукции***

$$e_L = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.16)$$

Здесь  $\Phi$  – это магнитный поток, пронизывающий контур  $L$ , или, что то же самое – магнитный поток, проходящий через площадь  $S$ , охватываемую замкнутым контуром  $L$ :

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (6.17)$$

Электродвижущая сила, возникающая в контуре  $L$  в соответствии с (6.16), есть ни что иное, как действие напряженности электрического поля (силы, действующей на единичный заряд – смотри лекцию №2) вдоль этого контура, то есть работа электрического поля по перемещению единичного заряда, которая определяется интегралом от  $\vec{E}$  вдоль всего этого контура:

$$e_L = \int_L \vec{E} d\vec{l} \quad (6.18)$$

Разделим выражение (6.16) на площадь  $S$

$$\frac{e_L}{S} = - \frac{1}{S} \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.19)$$

и начнем уменьшать контур  $L$  до размера точки, то есть стянем этот контур в точку. Соответственно, площадь  $S$ , охватываемая замкнутым контуром  $L$ , также будет стремиться к нулю. Математически это означает поиск предела левой и правой части уравнения (6.19) при стремлении  $S$  к 0:

$$\lim_{S \rightarrow 0} \frac{e_L}{S} = \lim_{S \rightarrow 0} \left( -\frac{1}{S} \frac{d\Phi}{dt} \right) \quad (6.20)$$

Сначала выясним, чему будет равна левая часть этого выражения. При этом вспомним понятие ротора векторного поля (6.10), рассмотренное ранее в этой лекции:

$$\lim_{S \rightarrow 0} \frac{e_L}{S} = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\int \vec{E} d\vec{l}}{S} = \text{rot} \vec{E} \quad (6.21)$$

Таким образом, при переходе к дифференциальной форме – к рассмотрению поля в отдельно взятой точке, слева в выражении (6.20) появляется ротор вектора напряженности электрического поля  $\text{rot} \vec{E}$ .

Теперь рассмотрим правую часть уравнения (6.20). Справа в выражении (6.20) стоит скорость изменения потока по времени, деленная на площадь. Поскольку поток вектора – это есть произведение вектора магнитной индукции на ту же площадь, то  $S$  в данном выражении сокращается и, таким образом, справа получаем просто производную магнитной индукции по времени  $-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ .

В результате, выражение (6.19) при стягивании контура  $L$  в точку (после нахождения пределов в левой и правой частях выражения (6.20)) превращается в следующее уравнение:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6.22)$$

### Уравнения электродинамики Максвелла

Если собрать вместе все приведенные выше уравнения, то мы получим уравнения, которые были сформулированы Джеймсом Клерком Максвеллом в 1860 году, и полностью описывают электромагнитное поле. Это и есть дифференциальная форма уравнений Максвелла:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6.23)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (6.24)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (6.25)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (6.26)$$

Данные уравнения дополняются следующими соотношениями:

$$\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{\mathbf{E}} \quad (6.27)$$

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu_0 \mu \vec{\mathbf{H}} \quad (6.28)$$

$$\vec{\mathbf{j}} = \sigma \vec{\mathbf{E}} \quad (6.29)$$

Совокупность семи уравнений (6.23) – (6.29) образует основу электродинамики - науки об электромагнитном поле.

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. В чем состоит принцип относительности, сформулированный Эйнштейном?
2. Каким образом принцип относительности распространяется на электромагнитные явления?
3. Какая форма уравнений электромагнитного поля называется дифференциальной?
4. Чем отличаются дифференциальная и интегральная формы описания поля?
5. Дайте определение понятию дивергенции.
6. Дайте определение понятию ротора векторного поля.
7. Запишите закон Ома в дифференциальной форме.
8. Запишите теорему Гаусса в дифференциальной форме.
9. В чем состоит физический смысл теоремы Гаусса, представленной в дифференциальной форме?
10. Что представляют собой магнитные заряды?
11. Чему равна дивергенция вектора индукции магнитного поля?
12. Где начинаются и где заканчиваются линии магнитной индукции?
13. Запишите закон полного тока в дифференциальной форме.
14. Закон полного тока для стационарного магнитного поля был модифицирован Максвеллом с целью его применения для описания поля, изменяющегося во времени. Какую составляющую добавил Максвелл?
15. Какой вид принимает уравнение, выражающее закон электромагнитной индукции, при его представлении в дифференциальной форме?
16. Запишите уравнения Максвелла в дифференциальной форме.
17. Что описывают уравнения Максвелла?

### Уровень курса

1. Электромагнитное поле. Общее представление. Связь с электрическим и магнитными полями. Принцип относительности.
2. Дивергенция и ротор векторного поля.
3. Теорема Гаусса в дифференциальной форме.
4. Закон полного тока в дифференциальной форме.
5. Закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме.
6. Уравнения электродинамики Максвелла и их физический смысл.

## Лекція № 7 часть 1

**Тема:** Электромагнитные волны**Оглавление**

Уравнения электродинамики в проекциях на оси координат .....	2
Волновое уравнение.....	3
Контрольные вопросы по теме .....	4
Уровень модуля.....	4
Уровень курса.....	4

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Уравнения электродинамики в проекциях на оси координат

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме имеют следующий вид:

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}} = - \frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} \quad (7.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{B}} = 0 \quad (7.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{j}} + \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} \quad (7.3)$$

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{D}} = \rho \quad (7.4)$$

Уравнения дополнены следующими соотношениями:

$$\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{\mathbf{E}} \quad (7.5)$$

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu_0 \mu \vec{\mathbf{H}} \quad (7.6)$$

$$\vec{\mathbf{j}} = \sigma \vec{\mathbf{E}} \quad (7.7)$$

Воспользуемся известными математическими выражениями для ротора векторного поля

$$\begin{aligned} (\operatorname{rot} \vec{\mathbf{A}})_x &= \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \\ (\operatorname{rot} \vec{\mathbf{A}})_y &= \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ (\operatorname{rot} \vec{\mathbf{A}})_z &= \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (7.8)$$

и спроектируем уравнения (7.1) и (7.3) на координатные оси. В результате получим вместо каждого из векторных уравнений три скалярных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= - \frac{\partial B_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= - \frac{\partial B_y}{\partial t} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= - \frac{\partial B_z}{\partial t} \end{aligned} \quad (7.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= j_x + \frac{\partial D_x}{\partial t} \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j_y + \frac{\partial D_y}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= j_z + \frac{\partial D_z}{\partial t} \end{aligned} \quad (7.10)$$

Если воспользоваться другим математическим выражением для дивергенции

$$\operatorname{div}\vec{\mathbf{A}} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (7.11)$$

то становится возможным записать уравнения (7.2) и (7.4) в скалярном виде:

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (7.12)$$

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \rho \quad (7.13)$$

### Волновое уравнение

Итак, переменное электрическое поле порождает магнитное, которое, вообще говоря, тоже оказывается переменным. Это переменное магнитное поле порождает электрическое поле и т. д. Таким образом, если возбудить с помощью зарядов переменное электрическое или магнитное поле, в окружающем пространстве возникнет последовательность взаимных превращений электрического и магнитного полей, распространяющихся от точки к точке. Этот процесс будет периодическим во времени и в пространстве и, следовательно, представляет собой волну. Вывод о возможности существования электромагнитных волн вытекает из уравнений Максвелла.

Уравнение вида

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (7.14)$$

представляет собой так называемое **волновое уравнение**. Всякая функция, удовлетворяющая такому уравнению, описывает некоторую волну, причем корень квадратный из величины, обратной коэффициенту при  $\frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$ , дает фазовую скорость этой волны.

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

1. Запишите выражения для вычисления проекций ротора вектора  $\mathbf{A}$  на оси координат.
2. Запишите уравнение электродинамики, связывающие напряженность электрического поля и магнитную индукцию, в проекциях на оси координат.
3. Запишите уравнение электродинамики, связывающие напряженность магнитного поля, плотность тока и электрическое смещение, в проекциях на оси координат.
4. Запишите выражения для вычисления дивергенции вектора  $\mathbf{A}$  по проекциям данного вектора на оси координат.
5. Запишите уравнение электродинамики для дивергенции вектора магнитной индукции в проекциях на оси координат.
6. Запишите уравнение электродинамики для дивергенции вектора электрического смещения в проекциях на оси координат.
7. Запишите выражение, которое носит название "волновое уравнение".
8. Какие коэффициенты входят в волновое уравнение? Каков их физический смысл?
9. Волны какой физической природы описывает волновое уравнение?

### *Уровень курса*

1. Уравнения электродинамики в проекциях на оси координат.
2. Волновое уравнение и его физический смысл.



## Лекція № 8

**Тема:** Электромагнитные волны**Оглавление**

Описание процесса распространения электромагнитной волны волновым уравнением .....	2
Плоская электромагнитная волна.....	4
Энергия электромагнитного поля .....	7
Контрольные вопросы по теме .....	9
Уровень модуля.....	9
Уровень курса.....	10

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Описание процесса распространения электромагнитной волны волновым уравнением

Итак, переменное электрическое поле порождает магнитное, которое, вообще говоря, тоже оказывается переменным. Это переменное магнитное поле порождает электрическое поле и т. д. Таким образом, если возбудить с помощью зарядов переменное электрическое или магнитное поле, в окружающем пространстве возникнет последовательность взаимных превращений электрического и магнитного полей, распространяющихся от точки к точке. Этот процесс будет периодическим во времени и в пространстве и, следовательно, представляет собой волну. Вывод о возможности существования электромагнитных волн вытекает из уравнений Максвелла.

Напишем уравнения Максвелла для однородной нейтральной ( $\rho = 0$ ) непроводящей ( $j = 0$ ) среды с постоянными проницаемостями  $\varepsilon$  и  $\mu$ . В этом случае

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} &= \mu_0 \mu \frac{\partial \vec{\mathbf{H}}}{\partial t}, & \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} &= \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{\mathbf{E}}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{\mathbf{B}} &= \mu_0 \mu \operatorname{div} \vec{\mathbf{H}} & \operatorname{div} \vec{\mathbf{D}} &= \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{div} \vec{\mathbf{E}} \end{aligned} \quad (7.1)$$

Следовательно, уравнения Максвелла в этом случае имеют следующий вид:

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}} = -\mu_0 \mu \frac{\partial \vec{\mathbf{H}}}{\partial t} \quad (7.2)$$

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{H}} = \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0 \quad (7.3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{\mathbf{E}}}{\partial t} \quad (7.4)$$

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{E}} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \quad (7.5)$$

Применим к уравнению (7.2) операцию  $\operatorname{rot}$

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}}) = -\mu_0 \mu \cdot \operatorname{rot} \left( \frac{\partial \vec{\mathbf{H}}}{\partial t} \right) \quad (7.6)$$

Оператор  $\operatorname{rot}$  означает дифференцирование по координатам. Меняя порядок дифференцирования по координатам и времени, можно написать

$$\operatorname{rot} \left( \frac{\partial \vec{\mathbf{H}}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}}) \quad (7.7)$$

Произведя в уравнении (7.6) эту замену и подставив в получившееся выражение значение (7.4) для  $rot \mathbf{H}$ , получим

$$rot(rot\vec{\mathbf{E}}) = -\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu \frac{\partial^2\vec{\mathbf{E}}}{\partial t^2} \quad (7.8)$$

Применив операцию  $rot$  к уравнению (7.4) и произведя аналогичные преобразования, придем к уравнению

$$rot(rot\vec{\mathbf{H}}) = -\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu \frac{\partial^2\vec{\mathbf{H}}}{\partial t^2} \quad (7.9)$$

Для проведения дальнейших преобразований необходимо воспользоваться следующей математической формулой, которая справедлива по отношению к векторным полям:

$$rot(rot\vec{\mathbf{A}}) = grad(div\vec{\mathbf{A}}) - \Delta\vec{\mathbf{A}} \quad (7.10)$$

Здесь  $\Delta$  – векторный оператор Лапласа:

$$\Delta\vec{\mathbf{A}} = \frac{\partial^2\vec{\mathbf{A}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vec{\mathbf{A}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vec{\mathbf{A}}}{\partial z^2} \quad (7.11)$$

В соответствии с (7.10) можно записать:

$$rot(rot\vec{\mathbf{E}}) = grad(div\vec{\mathbf{E}}) - \Delta\vec{\mathbf{E}} \quad (7.12)$$

При условии, выражаемом уравнением (7.5), первый член этого равенства обращается в нуль. Следовательно, левая часть формулы (7.8) может быть записана в виде  $-\Delta\vec{\mathbf{E}}$ . Опустив в получающейся формуле знак минус слева и справа, придем к уравнению:

$$\Delta\vec{\mathbf{E}} = \varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu \frac{\partial^2\vec{\mathbf{E}}}{\partial t^2} \quad (7.13)$$

или, расписав  $\Delta\vec{\mathbf{E}}$ ,

$$\frac{\partial^2\vec{\mathbf{E}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vec{\mathbf{E}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vec{\mathbf{E}}}{\partial z^2} = \varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu \frac{\partial^2\vec{\mathbf{E}}}{\partial t^2} \quad (7.14)$$

Аналогичным образом уравнение (7.9) можно преобразовать к виду:

$$\frac{\partial^2\vec{\mathbf{H}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vec{\mathbf{H}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vec{\mathbf{H}}}{\partial z^2} = \varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu \frac{\partial^2\vec{\mathbf{H}}}{\partial t^2} \quad (7.15)$$

Заметим, что уравнения (7.14) и (7.14) неразрывно связаны друг с другом, так как они получены из уравнений (7.2) и (7.4), каждое из которых содержит и **E** и **H**.

Уравнение вида

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (7.16)$$

представляет собой **волновое уравнение**. Всякая функция, удовлетворяющая такому уравнению, описывает некоторую волну, причем корень квадратный из величины, обратной коэффициенту при  $\frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$ , дает фазовую скорость этой волны. Таким образом, уравнения (7.14) и (7.15) указывают на то, что электромагнитные поля могут существовать в виде электромагнитных волн, фазовая скорость которых равна

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \quad (7.17)$$

Для вакуума по этой формуле получается

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м / сек} = c \quad (7.18)$$

Таким образом, в вакууме фазовая скорость электромагнитных волн совпадает со скоростью света.

### **Плоская электромагнитная волна**

Частным случаем распространения электромагнитной волны является плоская волна, когда волна распространяется только в одном направлении, а параметры поля во всей плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны одинаковы. То есть, в каждой отдельно взятой плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, во всей этой плоскости поле имеет одно и тоже направление и одну и ту же величину вектора напряженности электрического поля. И точно также в каждой такой плоскости по всей ее площади поле имеет одно и тоже направление и одну и ту же величину вектора напряженности магнитного поля. Можно сказать и по другому: в случае плоской волны, если волна распространяется вдоль оси  $x$ , то векторы напряженности электрического и магнитного поля не зависят от координат  $y$  и  $z$ . В данном случае эти вектора зависят только от координаты  $x$ . И, разумеется, от времени  $t$ .

Рассмотрим плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся в однородной непроводящей среде ( $\rho = 0, j = 0, \vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$ ,  $\varepsilon$  и  $\mu$  – постоянные). Направим ось  $x$  перпендикулярно к волновым поверхностям. Тогда  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ , а значит, и их составляющие не будут зависеть от координат  $y$  и  $z$ . Дополнительно будем полагать что первоначально было создано переменное электрическое поле, направленное вдоль оси  $y$ , то есть поле породила составляющая вектора напряженности  $E_y$ , при этом составляющая вдоль оси  $z$  в начальный момент времени отсутствовала  $E_z = 0$ .

В этом случае уравнения Максвелла, а также уравнения (7.14) и (7.15) существенно упрощаются. Не приводя математических выкладок, с которыми можно ознакомиться, например, в учебнике [3], укажем, что уравнения Максвелла могут быть сведены к паре уравнений:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu_0 \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (7.19)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (7.20)$$

А уравнения (7.14) и (7.15) примут вид:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (7.21)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} \quad (7.22)$$

Как видно, в уравнениях присутствуют только составляющие векторов  $E_y$  и  $H_z$ . Остальные составляющие  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  равны нулю, так что  $\mathbf{E} = E_y$  и  $\mathbf{H} = H_z$ . В соответствии с принятым предположением первоначально было создано переменное электрическое поле  $E_y$ , направленное вдоль оси  $y$ . Согласно уравнению (7.20) это поле создаст магнитное поле  $H_z$ , направленное вдоль оси  $z$ . В соответствии с уравнением (7.19) поле  $H_z$  создаст электрическое поле  $E_y$  и т. д. Ни поле  $E_z$ , ни поле  $H_y$  при этом не возникают. В уравнениях сохранены) индексы  $y$  и  $z$  при  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  для того, чтобы подчеркнуть то обстоятельство, что векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  направлены по взаимно перпендикулярным осям  $y$  и  $z$ .

Уравнения (7.21) и (7.22) представляют собой частный случай уравнений (7.14) и (7.15). Простейшим решением уравнения (7.21) будет функция

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kx + \alpha_1) \quad (7.23)$$

Решение уравнения (7.22) имеет аналогичный вид

$$H_z = H_m \cos(\omega t - kx + \alpha_2) \quad (7.24)$$

В этих формулах  $\omega$  – частота волны,  $k$  — волновое число, равное  $\omega/v$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – начальные фазы колебаний в точках с координатой  $x = 0$ .

Подставим функции (7.23) и (7.24) в уравнения (7.19) и (7.20):

$$kE_m \sin(\omega t - kx + \alpha_1) = \mu\mu_0\omega H_m \sin(\omega t - kx + \alpha_2) \quad (7.25)$$

$$kH_m \sin(\omega t - kx + \alpha_1) = \varepsilon\varepsilon_0\omega E_m \sin(\omega t - kx + \alpha_2) \quad (7.26)$$

Для того чтобы уравнения удовлетворялись, необходимо равенство начальных фаз  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Кроме того, должны соблюдаться соотношения:

$$kE_m = \mu\mu_0\omega H_m \quad (7.27)$$

$$kH_m = \varepsilon\varepsilon_0\omega E_m \quad (7.28)$$

Перемножив эти два равенства, находим, что

$$\varepsilon\varepsilon_0 E_m^2 = \mu\mu_0 H_m^2 \quad (7.29)$$

Таким образом, колебания электрического и магнитного векторов в электромагнитной волне происходят с одинаковой фазой ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ), а амплитуды этих векторов связаны соотношением

$$E_m \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = H_m \sqrt{\mu\mu_0} \quad (7.30)$$

Из формулы (7.30) вытекает, что между значениями  $E_m$  и  $H_m$  для волны, распространяющейся в пустоте, имеется соотношение

$$\frac{E_m}{H_m} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \sqrt{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 377 \text{ Ом} \quad (7.31)$$

Умножив уравнение (7.23) на орт оси  $y$  ( $E_y \mathbf{j} = \mathbf{E}$ ), а уравнение (7.24) (110.10) на орт оси  $z$  ( $H_z \mathbf{k} = \mathbf{H}$ ), получим уравнения плоской электромагнитной волны в векторном виде:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_m \cos(\omega t - kx) \quad (7.32)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_m \cos(\omega t - kx) \quad (7.33)$$

(мы положили  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ ).

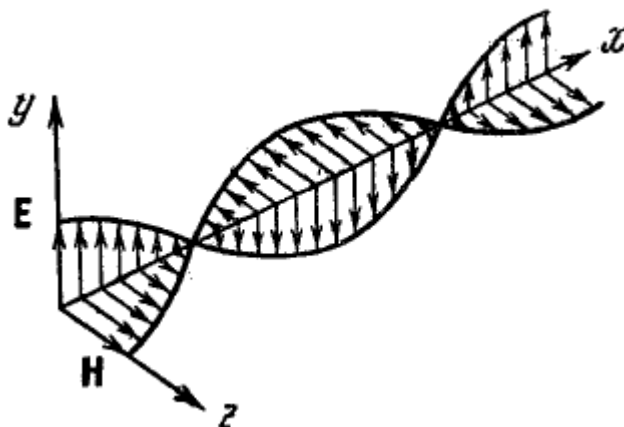


Рис. 1 Распространение плоской электромагнитной волны

На рис. 1 показана «моментальная фотография» плоской электромагнитной волны. Как видно из рисунка, векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему. В фиксированной точке пространства векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  изменяются со временем по гармоническому закону. Они одновременно увеличиваются от нуля, затем через  $1/4$  периода достигают наибольшего значения (причем, если  $\mathbf{E}$  направлен вверх, то  $\mathbf{H}$  направлен вправо; смотрим вдоль направления, по которому распространяется волна). Еще через  $1/4$  периода оба вектора одновременно обращаются в нуль. Затем опять достигают наибольшего значения (но на этот раз  $\mathbf{E}$  направлен вниз, а  $\mathbf{H}$  – влево). И, наконец, по завершении периода колебания векторы снова обращаются в нуль. Такие изменения векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  происходят во всех точках пространства, но со сдвигом по фазе, определяемым расстоянием между точками, отсчитанным вдоль оси  $x$ .

### Энергия электромагнитного поля

Возможность обнаружения электромагнитных волн (по проскакиванию искры, свечению лампочки и т. п.) указывает на то, что эти волны переносят энергию. Для описания переноса энергии волной введена векторная величина, называемая плотностью потока энергии. Она численно равна количеству энергии, переносимой в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению, в котором течет энергия. Направление вектора плотности потока энергии совпадает с направлением переноса энергии. Плотность потока энергии можно получить, умножив плотность энергии на скорость волны.

Плотность энергии электромагнитного поля  $w$  складывается из плотности энергии электрического поля и плотности энергии магнитного поля:

$$w = w_E + w_H = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} \quad (7.34)$$

В данной точке пространства векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  изменяются в одинаковой фазе (*примечание:* Это справедливо только для непроводящей среды. В проводящей среде фазы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  не совпадают). Поэтому соотношение (7.30) между амплитудными значениями  $E$  и  $H$  справедливо и для их мгновенных значений. Отсюда следует, что плотность энергии электрического и магнитного полей в каждый момент времени одинакова:  $w_E = w_H$ . Поэтому можно написать, что

$$w = 2w_E = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 \quad (7.35)$$

Воспользовавшись тем, что  $E\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = H\sqrt{\mu\mu_0}$ , выражению для плотности энергии электромагнитной волны можно придать вид

$$w = \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0} EH \quad (7.36)$$

В соответствии с формулой (7.17) скорость электромагнитной волны равна  $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}$ . Умножив плотность энергии  $w$  на скорость  $v$ , получим

плотность потока энергии

$$S = wv = EH \quad (7.37)$$

Векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  взаимно перпендикулярны и образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему. Поэтому направление вектора  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  совпадает с направлением переноса энергии, а модуль этого вектора равен  $EH$  ( $\sin \alpha = 1$ ). Следовательно, вектор плотности потока энергии можно представить как векторное произведение  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (7.38)$$

Вектор  $\mathbf{S}$  называется вектором Пойнтинга.



## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Что представляет собой электромагнитное поле? Чем оно отличается от электрического поля и магнитного поля?
2. Какой процесс характеризует изменение электромагнитного поля в пространстве и времени?
3. Запишите волновое уравнение, описывающее процесс распространения электромагнитной волны.
4. Как связаны фазовая скорость распространения электромагнитной волны с магнитной и диэлектрической проницаемостью среды ее распространения.
5. Чему равна фазовая скорость электромагнитных волн в вакууме?
6. Как связаны фазовая скорость электромагнитных волн в вакууме и скорость света?
7. Плоская электромагнитная волна - это общий или частный случай распространения электромагнитных волн?
8. Какую электромагнитную волну называют плоской?
9. От каких координат зависит вектор напряженности электрического поля при распространении плоской волны вдоль оси  $x$ ?
10. От каких координат не зависит вектор напряженности электрического поля при распространении плоской волны вдоль оси  $x$ ?
11. От каких координат зависит вектор напряженности магнитного поля при распространении плоской волны вдоль оси  $x$ ?
12. От каких координат не зависит вектор напряженности магнитного поля при распространении плоской волны вдоль оси  $x$ ?
13. От каких координат зависит вектор напряженности электрического поля при распространении плоской волны вдоль оси  $z$ ?
14. От каких координат не зависит вектор напряженности электрического поля при распространении плоской волны вдоль оси  $z$ ?
15. От каких координат зависит вектор напряженности магнитного поля при распространении плоской волны вдоль оси  $y$ ?
16. От каких координат не зависит вектор напряженности магнитного поля при распространении плоской волны вдоль оси  $y$ ?
17. Функцией каких переменных является вектор напряженности электрического поля при распространении плоской волны вдоль оси  $x$ ?
18. Функцией каких переменных является вектор напряженности магнитного поля при распространении плоской волны вдоль оси  $x$ ?
19. Запишите уравнения Максвелла для плоской электромагнитной волны.

20. Запишите волновое уравнение для плоской электромагнитной волны при ее распространении вдоль оси  $x$  в проекциях на оси координат.
21. Запишите решение волнового уравнения для случая плоской электромагнитной волны при ее распространении вдоль оси  $x$ .
22. Какими параметрами определяется распространение плоской электромагнитной волны?
23. Какая функция описывает изменение напряженности электрического и магнитного поля в пространстве и времени, по какому закону они изменяются?
24. Чему равно волновое число?
25. Как связаны амплитуды электрического и магнитного полей в плоской электромагнитной волне?
26. Чему численно равно отношение амплитуды электрического поля к амплитуде магнитного поля?
27. Из каких составляющих складывается плотность энергии электромагнитного поля? Запишите выражение.
28. Запишите выражение, определяющее вектор Пойнтинга.

### ***Уровень курса***

1. Описание волновым уравнением процесса распространения электромагнитной волны.
2. Плоская электромагнитная волна и ее описание.
3. Энергия электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга.

## Лекція № 9

**Тема:** Излучение электромагнитной волны (часть первая)

**Оглавление**

Уравнения электродинамики в проекциях на оси координат .....	2
Напряженность электромагнитного поля.....	3
Контрольные вопросы по теме .....	5
Уровень модуля.....	5
Уровень курса.....	5

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Уравнения электродинамики в проекциях на оси координат

В предыдущих лекциях были рассмотрены уравнения Максвелла, которые в дифференциальной форме имеют вид:

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}} = - \frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} \quad (9.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{B}} = 0 \quad (9.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{j}} + \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} \quad (9.3)$$

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{D}} = \rho \quad (9.4)$$

Уравнения Максвелла дополняются соотношениями:

$$\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{\mathbf{E}} \quad (9.5)$$

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu_0 \mu \vec{\mathbf{H}} \quad (9.6)$$

$$\vec{\mathbf{j}} = \sigma \vec{\mathbf{E}} \quad (9.7)$$

Эти уравнения раскрывают фундаментальную связь электрических и магнитных явлений, рассматривая электрическое и магнитное поле как одно целое - электромагнитное поле. Как видно из уравнения (9.1) электрическое поле появляется тогда, когда магнитное поле (индукция  $\mathbf{B}$ ) изменяется во времени. Аналогично (9.3), магнитное поле появляется при изменении во времени электрического поля (при изменении вектора смещения  $\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{\mathbf{E}}$ ). Изменение магнитного поля приводит к изменению электрического поля, изменение электрического поля приводит к изменению магнитного и так далее, и так далее. Уравнения (9.1) – (9.4) динамически связаны друг с другом.

В статическом случае, то есть, когда поля являются статическими – не меняющимися во времени, уравнения Максвелла распадаются на две независимые друг от друга группы. Первая группа, которая описывает статическое электрическое поле:

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}} = 0 \quad (9.8)$$

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{D}} = \rho \quad (9.9)$$

Здесь первое уравнение (9.8) отражает тот факт, что работа электростатического поля по перемещению электрического заряда по замкнутому контуру равна нулю, то есть то, что электростатическое поле является потенциальным (см. лекцию 3). Важно отметить, что электромагнитное поле уже не является потенциальным! Второе уравнение (9.9) выражает теорему Гаусса (см. лекцию 2), которая показывает, что источником статического электрического поля является только электрический заряд и ничто другое. Как мы уже знаем из уравнений электродинамики (9.1)

– (9.4), в случае электромагнитного поля переменное электрическое поле также может порождаться переменным магнитным полем! В этом отличие статических и динамических электрических полей (в этом случае мы говорим не об электрических, а об электромагнитных полях).

Вторая группа описывает чисто статическое магнитное поле:

$$\operatorname{div}\vec{\mathbf{B}} = 0 \quad (9.10)$$

$$\operatorname{rot}\vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{j}} \quad (9.11)$$

Эти уравнения говорят о том, что магнитных зарядов не существует, а источником стационарного магнитного поля является электрический ток, и это поле не является потенциальным (см. лекцию 5). При составлении уравнений электродинамики Максвелл ввел дополнительную составляющую  $\frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$ , которая отсутствует при описании статических полей (см. лекцию 6). Именно эта составляющая отражает связь переменных электрического и магнитного полей.

### Напряженность электромагнитного поля

Перейдем в область практического приложения теории электродинамики, в частности к вопросам излучения и приема электромагнитных волн. С точки зрения физики прием электромагнитных волн – это появление электрического тока внутри проводника. Электрический ток, как известно, – это направленное движение зарядов, и он возникает под действием электродвижущей силы. Если в проводнике, находящемся в электромагнитном поле возникает ток, значит на каком-то его участке имеется разность потенциалов. Значит, имеется напряженность электрического поля. Чем больше напряженность – тем больше возникающий (наводимый) в проводнике ток. Для того, чтобы понять, к появлению каких эффектов приводит наличие электромагнитного поля, прежде всего выясним, какие силы действует на заряд, помещенный в электромагнитное поле.

В общем случае, когда имеются электрическая и магнитная составляющая поля, на заряд  $q$  действует сила

$$\vec{\mathbf{F}} = q(\vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}) \quad (9.12)$$

где  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля,  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции  $\mathbf{v}$  – скорость движения заряда. Сразу отметим, что действие магнитной при протекании составляющей значительно, несравненно меньше, чем действие электрической.

Вспомним (лекция 2), что действие электростатического поля описывается законом Кулона, который определяет величины силы, действующей между двумя точечными зарядами:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (9.13)$$

Соответственно, напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом на расстоянии  $r$  от заряда, составляет:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (9.14)$$

## **Контрольные вопросы по теме**

---

*Уровень модуля*

*Уровень курса*

## Лекція № 9

**Тема:** Электромагнитное излучение**Оглавление**

Уравнения электродинамики (повторение).....	2
Напряженность электромагнитного поля движущегося заряда.....	3
Излучение гармонического сигнала.....	7
Интенсивность излучения.....	9
Контрольные вопросы по теме .....	10
Уровень модуля.....	10
Уровень курса.....	11

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.
4. Фенман



## Уравнения электродинамики (повторение)

В предыдущих лекциях были рассмотрены уравнения Максвелла, которые в дифференциальной форме имеют вид:

$$\operatorname{rot}\vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial\vec{\mathbf{B}}}{\partial t} \quad (9.1)$$

$$\operatorname{div}\vec{\mathbf{B}} = 0 \quad (9.2)$$

$$\operatorname{rot}\vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{j}} + \frac{\partial\vec{\mathbf{D}}}{\partial t} \quad (9.3)$$

$$\operatorname{div}\vec{\mathbf{D}} = \rho \quad (9.4)$$

Уравнения Максвелла дополняются соотношениями:

$$\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_0\varepsilon\vec{\mathbf{E}} \quad (9.5)$$

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu_0\mu\vec{\mathbf{H}} \quad (9.6)$$

$$\vec{\mathbf{j}} = \sigma\vec{\mathbf{E}} \quad (9.7)$$

Эти уравнения раскрывают фундаментальную связь электрических и магнитных явлений, рассматривая электрическое и магнитное поле как одно целое - электромагнитное поле. Как видно из уравнения (9.1) электрическое поле появляется тогда, когда магнитное поле (индукция  $\mathbf{B}$ ) изменяется во времени. Аналогично (9.3), магнитное поле появляется при изменении во времени электрического поля (при изменении вектора смещения  $\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_0\varepsilon\vec{\mathbf{E}}$ ). Изменение магнитного поля приводит к изменению электрического поля, изменение электрического поля приводит к изменению магнитного и так далее, и так далее. Уравнения (9.1) – (9.4) динамически связаны друг с другом.

В статическом случае, то есть, когда поля являются статическими – не меняющимися во времени, уравнения Максвелла распадаются на две независимые друг от друга группы. Первая группа, которая описывает статическое электрическое поле:

$$\operatorname{rot}\vec{\mathbf{E}} = 0 \quad (9.8)$$

$$\operatorname{div}\vec{\mathbf{D}} = \rho \quad (9.9)$$

Здесь первое уравнение (9.8) отражает тот факт, что работа электростатического поля по перемещению электрического заряда по замкнутому контуру равна нулю, то есть то, что электростатическое поле является потенциальным (см. лекцию 3). Важно отметить, что электромагнитное поле уже не является потенциальным! Второе уравнение (9.9) выражает теорему Гаусса (см. лекцию 2), которая показывает, что источником статического электрического поля является только электрический заряд и ничто другое. Как мы уже знаем из уравнений электродинамики (9.1)

– (9.4), в случае электромагнитного поля переменное электрическое поле также может порождаться переменным магнитным полем! В этом отличие статических и динамических электрических полей (поэтому в этом случае мы говорим не об электрических, а об электромагнитных полях).

Вторая группа описывает чисто статическое магнитное поле:

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{B}} = 0 \quad (9.10)$$

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{j}} \quad (9.11)$$

Эти уравнения говорят о том, что магнитных зарядов не существует, а источником стационарного магнитного поля является электрический ток, и это поле не является потенциальным (см. лекцию 5). При составлении уравнений электродинамики Максвелл ввел дополнительную составляющую  $\frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$ , которая отсутствует при описании статических полей (см. лекцию 6). Именно эта составляющая отражает связь переменных электрического и магнитного полей.

### **Напряженность электромагнитного поля движущегося заряда**

Перейдем в область практического приложения теории электродинамики, в частности к вопросам излучения и приема электромагнитных волн. С точки зрения физики прием электромагнитных волн – это появление электрического тока внутри проводника. Электрический ток, как известно, – это направленное движение зарядов, и он возникает под действием электродвижущей силы. Если в проводнике, находящемся в электромагнитном поле возникает ток, значит на каком-то его участке имеется разность потенциалов. Значит, имеется напряженность электрического поля. Чем больше напряженность – тем больше возникающий (наводимый) в проводнике ток. Для того, чтобы понять, к появлению каких эффектов приводит наличие электромагнитного поля, прежде всего выясним, какие силы действует на заряд, помещенный в электромагнитное поле.

В общем случае, когда имеются электрическая и магнитная составляющая поля, на заряд  $q$  действует сила

$$\vec{\mathbf{F}} = q(\vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}) \quad (9.12)$$

где  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля,  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции  $\mathbf{v}$  – скорость движения заряда. Сразу отметим, что действие магнитной составляющей значительно, несравненно меньше, чем действие электрической.

Вспомним (лекция 2), что действие электростатического поля описывается законом Кулона, который определяет величину силы, действующей между двумя точечными зарядами:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (9.13)$$

Соответственно, напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом на расстоянии  $r$  от заряда, составляет:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (9.14)$$

Как видно, напряженность поля убывает пропорционально квадрату расстояния от источника поля – заряда  $q$ .

В векторном виде эту формулу можно записать следующим образом:

$$\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \vec{e}_r \quad (9.15)$$

где  $\vec{e}_r$  – единичный вектор, направленный от точки, где измеряется поле в точку, где находится заряд.

Но эта формула справедлива только в том случае, если заряд  $q$  – неподвижен. Если же заряд, создающий поле, изменяет свое положение в пространстве, то есть имеет скорость и ускорение, то поле перестанет быть статическим, возникнет переменное электромагнитное поле. Каким будет напряженность  $\vec{E}$  этого поля?

Решение уравнений Максвелла для этого случая дают следующее выражение:

$$\vec{E} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{\vec{e}_r}{r^2} + \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \vec{e}_r \right] \quad (9.16)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме. Важно указать, что данная формула является упрощенной. Она не учитывает, что воздействие из точки, где находится заряд, в точку, где проводится наблюдение, идет с ограниченной скоростью - скоростью света. То есть формула (9.16) не учитывает это запаздывание. В более общем случае, с учетом запаздывания, данная формула принимает несколько более сложный вид. Ее вывод достаточно сложен, требует специальной подготовки и в настоящем курсе лекций не приводится. Однако, с ним можно ознакомиться в учебнике [4]. Для изучаемого нами предмета формула (9.16) дает всю необходимую информацию и является полностью приемлемой.

Итак, как можно видеть, первое слагаемое – это кулоновская сила. Второе слагаемое – новое, и оно зависит от второй производной по времени от единичного вектора, направленного из точки наблюдения на заряд. Это и есть напряженность поля, возникающая вследствие движения заряда, то есть – динамическая составляющая. Рассмотрим ее.

Первое, что мы видим. Если направление единичного вектора, который смотрит на заряд, не меняется, то это слагаемое равно нулю. Иначе говоря, если заряд совершает движения вдоль линии, направленной на наблюдателя, то наблюдатель ничего не заметит. Пробный заряд, находящийся у наблюдателя не будет испытывать никакой дополнительной силы. На пробный заряд будет действовать только кулоновская сила. Разумеется, она будет несколько меняться из-за изменения расстояния  $r$ .



Рис. 1 – Динамическая составляющая отсутствует

Рассмотрим другой случай. Пусть заряд совершает движения перпендикулярно линии от наблюдателя к заряду. Направим в этом направлении ось  $x$ . Пусть заряд за время  $\Delta t$  сместился на малую величину  $\Delta x$  и при этом  $\Delta x$  значительно меньше, чем расстояние  $r$ .

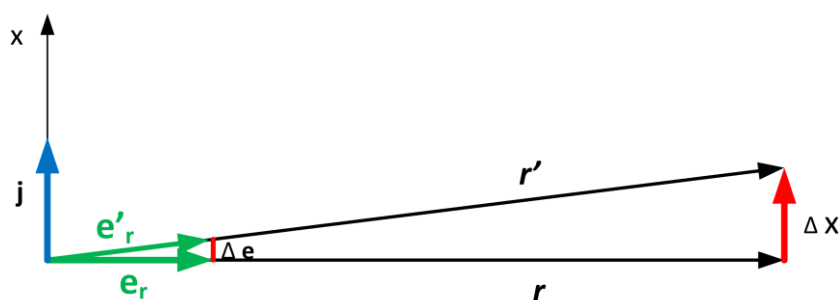


Рис. 2 – Движение заряда перпендикулярно линии от наблюдателя

Тогда в векторном виде изменение вектора  $\mathbf{r}$ :

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{r} - \mathbf{r}' \tag{9.17}$$

а изменение вектора  $\mathbf{e}$ :

$$\Delta \mathbf{e} = \mathbf{e} - \mathbf{e}' \tag{9.18}$$

Из геометрических соотношений, учитывая, что длина вектора  $\mathbf{e}$  равна единице, можно записать:

$$\Delta \mathbf{e} = \frac{\Delta \mathbf{x}}{r} \quad (9.19)$$

Если от малых величин  $\Delta$  перейти к бесконечно малым величинам, то можно записать:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{e}_r = \frac{1}{r} \frac{d}{dt} \mathbf{r} = \frac{1}{r} \frac{dx}{dt} \mathbf{j} \quad (9.20)$$

где  $\mathbf{j}$  – единичный вектор вдоль оси  $x$ .

Соответственно, для вторых производных:

$$\frac{d^2}{dt^2} \mathbf{e}_r = \frac{1}{r} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{r} = \frac{1}{r} \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{j} \quad (9.21)$$

В проекции на ось  $x$  для рассматриваемого нами случая при условии, что расстояние  $r$  достаточно велико получаем:

$$\left( \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{e}_r \right)_x = \frac{1}{r} \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{r} a_x \quad (9.22)$$

где  $a_x$  – ускорение заряда вдоль оси  $x$ .

Таким образом, мы видим, что напряженность, возникающая вследствие движения заряда, пропорциональна ускорению заряда при его движении в направлении, перпендикулярном направлению на наблюдателя. Ускорение заряда в направлении на или от наблюдателя не создает дополнительного поля.

Далее, анализируя совместно формулы (9.16) и (9.22), приходим к важному выводу:

Напряжённость поля, вызванная ускоренным движением заряда, убывает пропорционально **первой** степени расстояния до заряда. Напряженность поля, вызванная кулоновскими силами, убывает пропорционально **второй** степени расстояния.

Вследствие этого действие электростатического поля уменьшается значительно быстрее, чем действие электромагнитного поля.

С другой стороны, благодаря тому, что действие электромагнитного убывает просто пропорционально расстоянию, эффективное использование

электромагнитного излучения для передачи сообщений становится возможным.

Возвращаясь к формуле (9.16), приходим к следующему заключению. На больших расстояниях величина составляющей, отражающей действие кулоновских сил может не учитываться. На практике большими расстояниями можно считать расстояния, превышающее несколько метров. В практически значимых случаях с большой степенью точности величина напряженности электромагнитного поля в данной точке пространства в проекции на ось  $x$ , перпендикулярную направлению из данной точки на заряд, может быть представлена формулой:

$$E_x(t) = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r c^2} a_x \left( t - \frac{r}{c} \right) \quad (9.23)$$

где  $a_x$  – ускорение заряда вдоль оси  $x$ . В данной формуле уже учтено запаздывание от распространения волны, которое происходит в вакууме со скоростью  $c$ . Можно сказать таким образом: напряженность поля в данной точке в данный момент времени соответствует ускорению заряда, которое было в момент времени в прошлом, отстоящий от настоящего на время  $r/c$ . Время  $r/c$  – это как раз и есть тот интервал времени, за которое электромагнитная волна преодолевает расстояние  $r$  со скоростью  $c$ .

Итак, напряженность электрического поля в некоторой точке пространства возникает вследствие ускоренного движения заряда.

Если необходимо создать электромагнитное поле и излучать электромагнитную энергию, то необходимо заставить заряд двигаться с ускорением. Самым простым способом получения излучения является пропускание переменного тока через проводник. Постоянный ток – это движение зарядов в одном направлении с постоянной скоростью (поток заряда постоянен), без ускорения зарядов. Это означает, что постоянный ток не приводит к появлению электромагнитного излучения.

### **Излучение гармонического сигнала**

Пусть заряд изменяет свое положение вдоль оси  $x$  перпендикулярно направлению на наблюдателя по гармоническому закону:

$$x = A \cos \omega t \quad (9.24)$$

Тогда скорость изменения положения заряда:

$$\dot{x} = -A\omega \sin \omega t \quad (9.25)$$

а ускорение заряда будет равно:

$$\ddot{x} = -A\omega^2 \cos \omega t \quad (9.26)$$

Подставляем полученное значение ускорения в формулу (9.23) и получаем, что проекция напряженности поля на ось  $x$  в точке наблюдения (рис. 2) будет представлять собой функцию времени следующего вида:

$$E_x(t) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 rc^2} A\omega^2 \cos \omega \left( t - \frac{r}{c} \right) \quad (9.27)$$

То есть, проекция напряженности меняется по гармоническому закону, а ее амплитуда составляет:

$$E_{x\max} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 rc^2} A\omega^2 \quad (9.28)$$

Далее нам потребуется несколько другой вид этой формулы

$$E_{x\max} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 rc^2} A\omega^2 = \frac{qA\omega}{4\pi\epsilon_0 rc^2} \omega = \frac{qv_{\max}}{4\pi\epsilon_0 rc^2} \omega \quad (9.29)$$

Здесь мы использовали то обстоятельство, что согласно формуле (9.25)  $A\omega$  – это амплитуда скорости движения заряда, то есть:

$$v_{\max} = A\omega \quad (9.30)$$

На практике мы имеем дело не с зарядами и амплитудами их движения, а с силой тока в проводнике. Было бы важно знать, какую амплитуду напряженности поля создаст в данной точке пространства проводник бесконечно малой длины  $dl$ , отстоящий от точки наблюдения на расстояние  $r$  и в котором протекает переменный синусоидальный ток с амплитудой  $I_{\max}$ . В этом случае проводник с током представляет собой излучающую антенну, а формула для проекции напряженности поля на ось  $x$  в точке наблюдения при излучении данной антенны имеет вид, аналогичный (9.28):

$$E_{x\max} = \frac{I_{\max} dl}{4\pi\epsilon_0 rc^2} \omega \quad (9.31)$$

Формула (9.31) получается из формулы (9.29), если в ней заменить  $qv_{\max}$  на  $I_{\max} dl$ . Возможность такой замены можно подтвердить проверкой размерности.

Таким образом, как можно видеть из формулы (9.31), напряженность, а, следовательно, величина принимаемого сигнала зависит

- прямо пропорціонально от силы тока в излучателе, от частоты переменного тока в излучателе и, вообще говоря, от его длины (если отрезок проводника имеет длину  $L$ , то для получения значения напряженности, необходимо выполнить интегрирование)
- обратно пропорционально расстоянию до источника сигнала

$$I_{np} \sim \frac{I_{\max} f}{r} \quad (9.32)$$

Поскольку мощность  $P_{np}$  принимаемого сигнала, по существу, представляет собой квадрат силы тока, то для мощности действует следующая зависимость:

$$P_{np} \sim \frac{I_{\max}^2 f^2}{r^2} \quad (9.33)$$

### Интенсивность излучения

Энергия, излучаемая по всем направлениям в единицу времени, называется интенсивностью (или мощностью) излучения. Если взять источник сигнала – ускоренно двигающийся заряд и охватить его условно сферой, то можно рассчитать мощность излучения, проходящую через эту сферу. Соответствующий расчет дает для средней интенсивности излучения следующее выражение:

$$\bar{I} = \frac{q^2}{12\pi\epsilon_0 c} A^2 \omega^4 \quad (9.34)$$

В ходе расчета учтено, что среднее значение квадрата косинуса равно одной второй:  $\overline{\cos^2 \omega t} = \frac{1}{2}$

Если же рассматривать проводник бесконечно малой длины  $dl$ , в котором протекает переменный синусоидальный ток с амплитудой  $I_{\max}$ , то по аналогии с (9.31) получаем:

$$\bar{I} = \frac{I_{\max}^2 dl^2}{12\pi\epsilon_0 c} \omega^2 \quad (9.35)$$

Таким образом, средняя интенсивность излучения излучателя пропорциональна квадрату амплитуды синусоидального тока и квадрату частоты. Поэтому при малой частоте излучение электрических систем (например, линий передачи переменного тока промышленной частоты) бывает незначительным.



## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Какие силы действуют на электрический заряд в электромагнитном поле?
2. Запишите общую формулу, выражающую силу, действующую на электрический заряд в электромагнитном поле.
3. В каком случае на электрический заряд действует сила, которая выражается только законом Кулона?
4. Какое направление ускорения заряда дает наибольшую величину динамической составляющей напряженности электрического поля в точке наблюдения?
5. Какое направление ускорения заряда дает наименьшую величину динамической составляющей напряженности электрического поля в точке наблюдения?
6. Какое поле с увеличением расстояния убывает быстрее: электростатическое, магнитное или электромагнитное?
7. Каким образом характеризуется зависимость величины напряженности электрического поля от расстояния для электростатического поля?
8. Каким образом характеризуется зависимость величины напряженности электрического поля от расстояния для магнитного поля?
9. Каким образом характеризуется зависимость величины напряженности электрического поля от расстояния для электромагнитного поля?
10. Какое движение нужно придать электрическому заряду для того, чтобы вокруг него возникло электромагнитное поле?
11. Какое утверждение правильно: проводник с постоянным электрическим током создает вокруг себя:
  - а) стационарное электрическое поле
  - б) стационарное магнитное поле
  - в) электромагнитное поле?
12. Какое утверждение правильно: проводник с переменным электрическим током создает вокруг себя:
  - а) стационарное электрическое поле
  - б) стационарное магнитное поле
  - в) электромагнитное поле?
13. Напряженность электромагнитного поля в точке приема зависит от амплитуды синусоидального тока в излучающем проводнике:
  - а) прямо пропорционально
  - б) обратно пропорционально

- c) квадратично
  - d) обернено пропорційно квадрату
  - e) не залежить?
14. Напруженість електромагнітного поля в точці прийому залежить від відстані до випромінюючого провідника з змінним струмом:
- a) прямо пропорційно
  - b) обернено пропорційно
  - c) квадратично
  - d) обернено пропорційно квадрату
  - e) не залежить?
15. Напруженість електромагнітного поля в точці прийому залежить від частоти синусоїдального струму в випромінюючому провіднику:
- a) прямо пропорційно
  - b) обернено пропорційно
  - c) квадратично
  - d) обернено пропорційно квадрату
  - e) не залежить?
16. Яку величину називають інтенсивністю випромінювання?
17. Середня інтенсивність випромінювання залежить від амплітуди синусоїдального струму в випромінюючому провіднику:
- a) прямо пропорційно
  - b) обернено пропорційно
  - c) квадратично
  - d) обернено пропорційно квадрату
  - e) не залежить?
18. Середня інтенсивність випромінювання залежить від частоти синусоїдального струму в випромінюючому провіднику:
- a) прямо пропорційно
  - b) обернено пропорційно
  - c) квадратично
  - d) обернено пропорційно квадрату
  - e) не залежить?

### **Уровень курса**

1. Напруженість електромагнітного поля рухомого заряду.
2. Випромінювання гармонічного сигналу.
3. Інтенсивність випромінювання

## Лекція № 10

**Тема:** Применение экранирования для технической защиты информации. Способы экранирования.

**Оглавление**

Вихревые токи.....	3
Нежелательные излучения технических средств обработки информации .....	6
Нежелательные связи электрических цепей .....	6
Связь через ближнее электрическое и магнитное поля .....	7
Связь через электромагнитное поле.....	8
Связь через общее сопротивление .....	9
Утечка информации по цепям заземления .....	10
Защитное заземление .....	10
Попадание опасного сигнала в систему заземления .....	11
Экранирование .....	12
Электромагнитное экранирование и развязывающие цепи .....	12
Подавление емкостных паразитных связей .....	14
Подавление индуктивных паразитных связей .....	14
Экранирование линий связи .....	14
Экранированные помещения .....	15
Контрольные вопросы по теме .....	18
Уровень модуля.....	18
Уровень курса.....	19

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2–07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## **Вихревые токи**

---

Вихревыми токами или токами Фуко называются индукционные токи, которые появляются в электропроводящих материалах под действием изменяющегося внешнего магнитного поля. Возникающие в материале токи имеют форму вихря, вследствие чего называются вихревыми или «токами Фуко», по имени ученого, детально исследовавшим это явление. Само явление было открыто в 1928г французским учёным Д. Ф. Араго, и впоследствии было объяснено М.Фарадеем как проявление закона электромагнитной индукции.

Токи Фуко (в честь Фуко, Жан Бернар Леон) – это вихревые замкнутые электрические токи в массивном проводнике, которые возникают при изменении пронизывающего его магнитного потока. Вихревые токи являются индукционными токами и образуются в проводящем теле либо вследствие изменения во времени магнитного поля, в котором находится тело, либо вследствие движения тела в магнитном поле, приводящего к изменению магнитного потока через тело или какую-либо его часть. Величина токов Фуко тем больше, чем быстрее меняется магнитный поток.

В отличие от электрического тока в проводах, текущего по точно определённым путям, вихревые токи замыкаются непосредственно в проводящей массе, образуя вихреобразные контуры. Эти контуры тока взаимодействуют с породившим их магнитным потоком. Согласно правилу Ленца, магнитное поле вихревых токов направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующего эти вихревые токи.

Вихревые токи приводят к неравномерному распределению магнитного потока по сечению магнитопровода. Это объясняется тем, что в центре сечения магнитопровода намагничивающая сила вихревых токов, направленная навстречу основному потоку, является наибольшей, так как эта часть сечения охватывается наибольшим числом контуров вихревого тока. Такое «вытеснение» потока из середины сечения магнитопровода выражено тем резче, чем выше частота переменного тока и чем больше магнитная проницаемость ферромагнетика. При высоких частотах поток проходит лишь в тонком поверхностном слое сердечника. Это вызывает уменьшение кажущейся (средней по сечению) магнитной проницаемости. Явление вытеснения из ферромагнетика магнитного потока, изменяющегося с большой частотой, аналогично электрическому скин-эффекту и называемому магнитным скин-эффектом.

Глубина проникновения вихревых токов может быть рассчитана следующим образом:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}},$$

где  $\delta$  – глубина проникновения (м),  $f$  – частота (Гц),  $\mu$  – магнитная проницаемость материала (Гн/м), и  $\sigma$  – электрическая проводимость материала (См/м).

В соответствии с законом Джоуля - Ленца вихревые токи нагревают проводники, в которых они возникли. Поэтому вихревые токи приводят к потерям энергии (потери на вихревые токи) в магнитопроводах (в сердечниках трансформаторов и катушек переменного тока, в магнитных цепях машин).

При определенных допущениях (однородный материал, однородное магнитное поле, отсутствие скин-эффекта и т.п.) потеря мощности на вихревые токи в единице массы тонкого листа или в проводе может быть выражена следующей формулой:

$$P = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6k\rho D},$$

где

$P$  – мощность, теряемая на единицу массы (Вт/кг),

$B_p$  – максимальное значение индукции магнитного поля (Тл),

$d$  – толщина листа или диаметр проволоки (м),

$f$  – частота (Гц),

$k$  – постоянная, равная либо 1 для тонкого листа, либо 2 для проволоки,

$\rho$  – удельное сопротивление материала (Ом·м),

$D$  – плотность материала (кг/м<sup>3</sup>).

Для уменьшения потерь энергии на вихревые токи (и вредного нагрева магнитопроводов) и уменьшения эффекта «вытеснения» магнитного потока из ферромагнетиков магнитопроводы машин и аппаратов переменного тока делают не из сплошного куска ферромагнетика (электротехнической стали), а из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Такое деление на пластины, расположенные перпендикулярно направлению вихревых токов, ограничивает возможные контуры путей вихревых токов, что сильно уменьшает величину этих токов. При очень высоких частотах применение ферромагнетиков для магнитопроводов нецелесообразно; в этих случаях их делают из магнитодиэлектриков, в которых вихревые токи практически не возникают из-за очень большого сопротивления этих материалов.

При движении проводящего тела в магнитном поле индуцированные вихревые токи обуславливают заметное механическое взаимодействие тела с полем. Токи Фуко, как и индукционные токи в простых линейных

проводниках, имеют направление, которое подчиняется правилу Ленца: их магнитное поле направлено так, чтобы быть препятствием изменению магнитного потока, который вызывает вихревые токи. Например, если между полюсами невключенного электромагнита массивный медный маятник совершает практически незатухающие колебания (рис. 1), то при включении тока он начинает сильно тормозить и очень быстро останавливается. Этот опыт объясняется тем, что возникшие токи Фуко имеют направление, при котором действующие на них со стороны магнитного поля силы оказывают тормозящее действие на маятник и он быстро останавливается. Этот факт практически применяется для успокоения (демпфирования) подвижных частей различных приборов и механизмов. Если сделать радиальные вырезы в описанном маятнике, то вихревые токи ослабляются и торможение почти отсутствует.

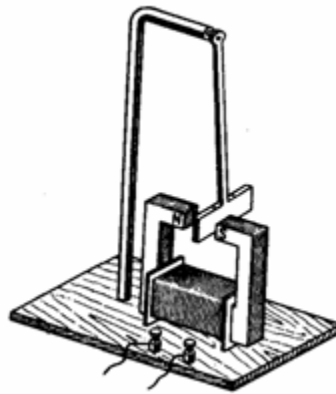


Рис. 1. Опыт с маятником для демонстрации действия токов Фуко

Вихревые токи возникают и в самом проводнике, по которому течёт переменный ток, что приводит к неравномерному распределению тока по сечению проводника. В моменты увеличения тока в проводнике индукционные вихревые токи направлены у поверхности проводника по первичному электрическому току, а у оси проводника – навстречу току. В результате внутри проводника ток уменьшится, а у поверхности увеличится. Токи высокой частоты практически текут в тонком слое у поверхности проводника, внутри же проводника тока нет. Это явление называется электрическим скин-эффектом.

Вихревые токи применяются для пайки, плавки и поверхностной закалки металлов, а их силовое действие используется в успокоителях колебаний подвижных частей приборов и аппаратов, в индукционных тормозах (в которых массивный металлический диск вращается в поле электромагнитов) и т. п.

## **Нежелательные излучения технических средств обработки информации**

---

Технические средства, не являющиеся радиопередающими устройствами, также могут быть источниками нежелательных электромагнитных излучений. Излучения таких технических средств обработки информации называются побочными электромагнитными излучениями. Существуют различные причины возникновения побочных излучений. В цепях различных устройств протекают переменные электрические токи, порождающие электромагнитные поля, излучаемые в окружающее пространство. Структура и параметры электромагнитных полей, создаваемых токоведущими элементами, определяются конструктивными особенностями систем и средств информатизации и связи, а также условиями их размещения и эксплуатации. Такие электромагнитные излучения, например излучения, возникающие при работе ПЭВМ (излучения дисплея, усилителей записи и считывания, кабельных соединений и т.д.), являются потенциальными носителями опасного сигнала.

Технические средства различного назначения могут иметь в своем составе устройства, которые для выполнения своих основных функций генерируют электромагнитные колебания (эталонные и измерительные генераторы, генераторы тактовых частот, генераторы развертки электронно-лучевых трубок, гетеродины радиоприемных устройств и т.д.).

### **Нежелательные связи электрических цепей**

---

Между двумя электрическими цепями (элементами, узлами, средствами), находящимися на некотором расстоянии друг от друга, могут возникать нежелательные электромагнитные связи. Наличие таких связей приводит к тому, что сигналы, циркулирующие в одной цепи (в цепи источника наводки), появляются в другой электрической цепи (в цепи рецептора наводки). Основными путями возникновения нежелательных связей являются:

- ближнее электрическое поле;
- ближнее магнитное поле;
- электромагнитное поле излучения;

На малых расстояниях могут существовать все указанные виды нежелательной связи. С увеличением расстояния ослабевают и исчезают связи через ближнее электрическое и магнитное поля, а на больших расстояниях – и через электромагнитное поле излучения.



### ***Связь через ближнее электрическое и магнитное поля***

Теоретически полная независимость ближнего электрического и магнитного полей может наблюдаться только в статических условиях. Электростатическим называется поле неподвижных зарядов. При любом перемещении этих зарядов появляется магнитное поле. Точно так же магнитостатическим является поле постоянного магнита или электромагнита, питаемого постоянным током. При любом изменении этого поля появляется электрическое поле. Исчерпывающий анализ связи цепей с учетом взаимозависимости электрического и магнитного полей может быть выполнен с помощью уравнений Максвелла. Вместе с тем приемлемые для практики результаты получаются при рассмотрении нежелательных связей между цепями в предположении полной взаимной независимости ближнего электрического и магнитного полей. В этом случае связь между источником и рецептором наводки через ближнее электрическое поле рассматривается как емкостная связь через малую паразитную емкость без учета появляющегося при этом магнитного поля. Связь через ближнее магнитное поле рассматривается как индуктивная связь между источником и рецептором наводки через малую паразитную взаимную индуктивность без учета появляющегося при этом электрического поля.

Емкостная и индуктивная нежелательные связи могут появляться и при отсутствии непосредственной связи между источником и рецептором наводки. Рассмотрим случай размещения источника и рецептора наводки в отдельных экранированных отсеках. Через оба отсека проходит провод АВ, не имеющий отношения ни к источнику, ни к рецептору наводки. Этот провод имеет емкость  $C_1$  (рис. 2) или взаимную индуктивность  $M_1$  (рис. 3) по отношению к источнику наводки и емкость  $C_2$  или взаимную индуктивность  $M_2$  по отношению к рецептору наводки.

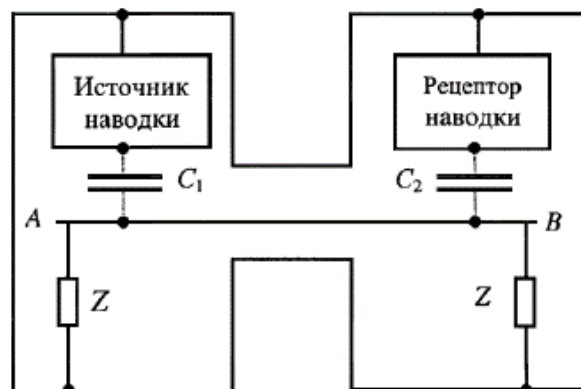


Рис. 2. Емкостная нежелательная связь через случайный провод АВ

Таким образом, из-за наличия провода АВ источник и приемник наводки оказываются взаимно связанными. Величина этой связи определяется значениями  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  и полного сопротивления  $Z_{AB}$  постороннего провода относительно корпуса.

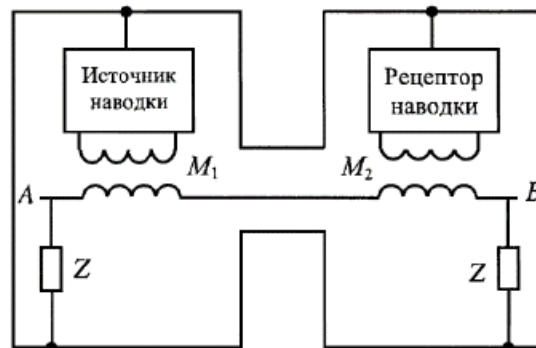


Рис. 3. Индуктивная нежелательная связь через случайный провод АВ

На рис. 4 представлена эквивалентная схема для случая емкостной связи, из которой следует, что элементы  $C_1$  и  $Z_{AB}$  представляют собой делитель, плечи которого определяют величину напряжения, наводимого через емкость  $C_2$  на рецепторе.

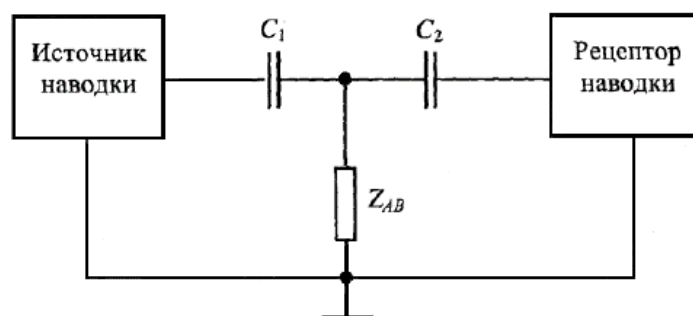


Рис. 4. Емкостная нежелательная связь по схеме делителя

Аналогичные эквивалентные схемы могут быть составлены для случаев индуктивной и смешанной связей.

### ***Связь через электромагнитное поле***

Электромагнитные излучения, сопутствующие работе технических средств систем информатизации и связи, распространяются в окружающее пространство. В зону действия этих излучений попадает большое количество токопроводящих элементов и конструкций, обладающих свойствами антенн. В таких случайных антеннах электромагнитное поле наводит ЭДС или ток опасного сигнала. Роль случайных антенн могут играть проводники монтажных схем технических средств, токоведущие элементы систем заземления, металлические корпуса аппаратуры, металлоконструкции систем

водоснабження и канализации, посторонние протяженные проводники (например, провода открытой телефонной или громкоговорящей связи, сигнализации, часофикации, электропитания и т.д.). Токи опасных сигналов, наводимые электромагнитными полями, сопутствующими работе технических средств, распространяясь по токоведущим коммуникациям, создают реальные предпосылки утечки информации.

### **Связь через общее сопротивление**

В конструкциях технических средств часто обнаруживаются общие сопротивления  $Z_{\text{общ}}$ , входящие одновременно в цепи источников и рецепторов наводки. На рис. 5 представлена эквивалентная схема такого включения:

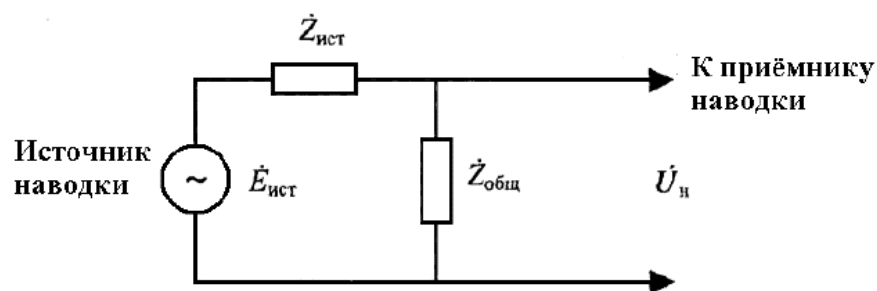


Рис. 5. Пример эквивалентной схемы включения

Связь через общее сопротивление проявляется чаще других встречающихся видов нежелательной связи. Это прежде всего связь через внутреннее сопротивление и соединительные провода источников питания или управления (рис. 6)

Через цепь источника питания протекают токи всех частот, составляющих спектр сигнала источника наводки. Эти токи создают падение напряжения и на всех сопротивлениях, включенных в цепь питания.

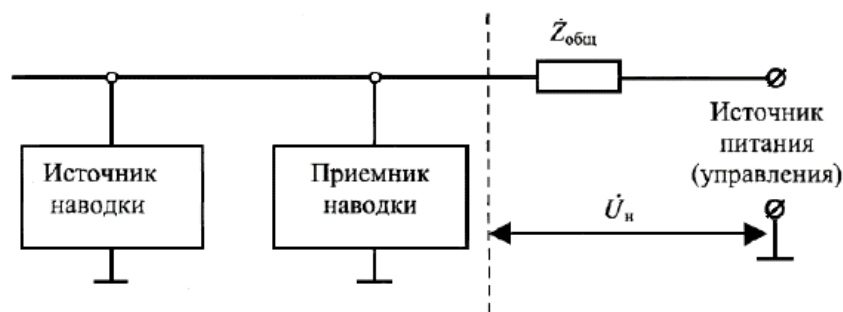


Рис. 6 Связь через общее сопротивление источника питания

Сопротивление  $Z_{\text{общ}}$  оказывается включенным в цепи приемника наводки, и напряжение  $U_n$ , снимаемое с  $Z_{\text{общ}}$ , является наводимым напряжением. Величина сопротивления  $Z_{\text{общ}}$  зависит от частоты наводимого

напряжения. Для постоянного тока и очень низких частот – это в основном сопротивление дросселей фильтра и диодов выпрямителя или внутреннее сопротивление химических источников питания. Для звуковых частот – активное сопротивление проводов и емкостное сопротивление выходного конденсатора фильтра питания. На высоких частотах величина  $Z_{\text{общ}}$  зависит в основном от индуктивного сопротивления соединительных проводов и конденсаторов фильтра питания. Индуктивности проводов и распределенные емкости монтажа могут образовывать резонансные контуры. При неблагоприятном сочетании величин индуктивности и емкости величина  $Z_{\text{общ}}$  на некоторых высоких частотах может быть достаточно большой. К рассматриваемому виду нежелательной связи относится связь через общие отрезки проводов и общие участки корпуса, по которому протекают блуждающие токи. Вероятность проявления такой связи увеличивается с ростом частоты.

### **Утечка информации по цепям заземления**

---

Заземлением называется преднамеренное соединение объекта с заземляющим устройством. Заземление осуществляется путем создания системы проводящих поверхностей и электрических соединений, предназначенных для выполнения различных функций.

### **Защитное заземление**

Защитное заземление предназначено для исключения поражения обслуживающего персонала электрическим током. Защитное заземление должно поддерживать элементы конструкции при одном и том же потенциале, равном или близком к потенциалу «земли», и обеспечивать низкоомную нагрузку для больших токов, возникающих в системах при аварийных ситуациях. Как правило, защитные заземления должны иметь хороший низкоомный контакт с «землей», поэтому их часто называют наружными заземлителями. Наружные заземлители осуществляют заземление силовых систем, радиочастотных антенн, молниеотводов, стекателей статического электричества и т.д.

Рабочие заземления включают в себя заземление силового оборудования (сильноточных цепей) и сигнальное или схемное заземление, которое обеспечивает формирование опорного потенциала, необходимого для работы электронных схем.

Заземление экранирующих поверхностей способствует ослаблению нежелательных связей и является составной частью системы экранирования. Проводящие поверхности и электрические соединения системы заземления

экранов предназначены для протекания обратных токов в сигнальных цепях и цепях электропитания.

### **Попадание опасного сигнала в систему заземления**

Одной из причин попадания опасного сигнала в систему заземления является наличие электромагнитного поля – носителя опасного сигнала в местах расположения элементов системы заземления. Это электромагнитное поле будет наводить в расположенной поблизости системе заземления ток опасного сигнала. Аналогичным образом опасные сигналы могут наводиться на цепь, образуемую нулевым проводом, через который ток опасного сигнала будет попадать в систему заземления и далее в грунт. Величина тока опасного сигнала в этом случае будет определяться интенсивностью воздействующего электромагнитного поля, сопротивлением цепей заземления и проводимостью почвы.

Проникновение опасного сигнала в цепи заземления может быть связано с образованием так называемых контуров заземления. Рассмотрим два устройства, соединенные парой проводников, один из которых является сигнальным, а другой служит для протекания обратных токов (рис. 7).

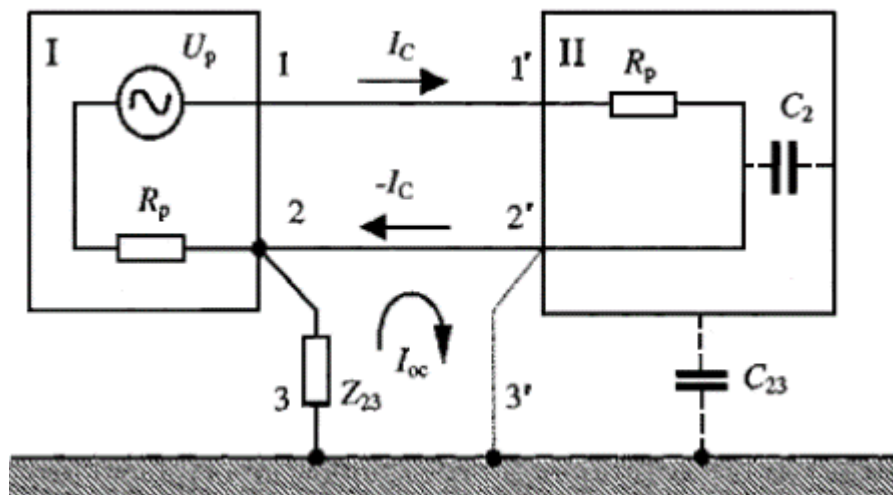


Рис. 7. Пример заземления двух устройств, соединенные парой проводников

Еще одна причина появления опасного сигнала в цепи заземления связана с конечным значением величины сопротивления заземляющих проводников. По заземляющему проводнику протекает обратный электрический ток опасного сигнала (рис. 8).

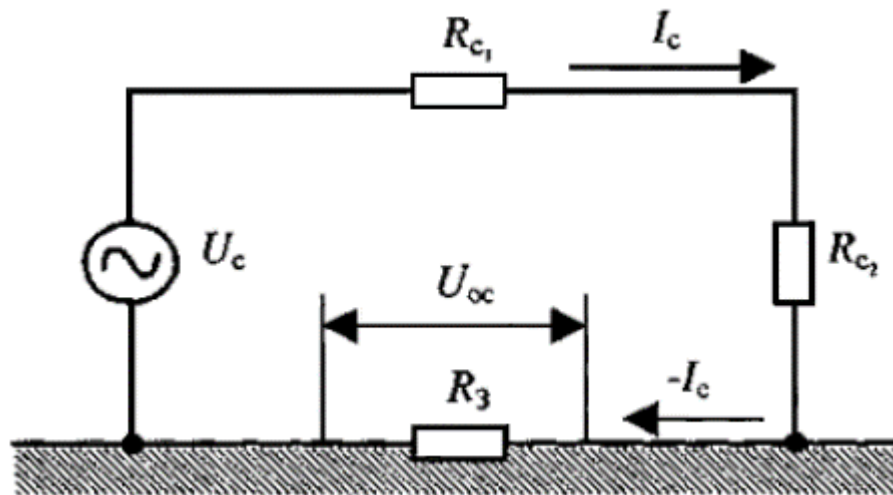


Рис. 8. Пример заземления с конечным значением величины сопротивления заземляющих проводников

### Экранирование

#### *Электромагнитное экранирование и развязывающие цепи*

Для снижения наводок необходимо устранять или ослаблять до допустимых значений паразитные связи. В первую очередь ослабление паразитных связей должно производиться прямым уменьшением паразитной емкости, взаимной индуктивности и паразитного сопротивления. Способы уменьшения паразитных связей в принципе несложны: размещение вероятных источников и приемников наводок на максимально возможном расстоянии друг от друга; уменьшение габаритов токонесущих элементов, обеспечивающих минимум паразитной связи (для получения минимальной взаимоиנדуктивности катушек индуктивности их оси должны быть взаимно перпендикулярны): сведение к минимуму общих сопротивлений: изъятие посторонних проводов, проходящих через несколько узлов или блоков, которые могут связать элементы, расположенные достаточно далеко друг от друга; при невозможности исключения посторонних проводов, создающих паразитную связь, необходимо позаботиться о том, чтобы при емкостной паразитной связи сопротивление постороннего провода относительно корпуса было минимальным, при индуктивной паразитной связи необходимо увеличивать внутреннее сопротивление посторонней линии связи, в последнюю очередь – экранирование и развязывающие фильтры.

Экранирование – это локализация электромагнитной энергии в пределах определенного пространства путем преграждения ее распространения.

Развязывающий фильтр – это устройство, ограничивающее распространение помехи по проводам, являющимся общими для источника и приемника наводки.

Применение качественных экранов позволяет решать многие задачи, среди которых защита информации в помещениях и технических каналах, задачи электромагнитной совместимости оборудования и приборов при их совместном использовании, задачи защиты персонала от повышенного уровня электромагнитных полей и обеспечение благоприятной экологической обстановки вокруг работающих электроустановок и СВЧ-устройств.

Под экранированием в общем случае понимается как защита приборов от воздействия внешних полей, так и локализация излучения каких-либо средств, препятствующая проявлению этих излучений в окружающей среде. В любом случае эффективность экранирования – это степень ослабления составляющих поля (электрической или магнитной), определяемая как отношение действующих значений напряженности полей в данной точке пространства при отсутствии и наличии экрана. Так как отношение этих величин достигает больших значений, то удобнее пользоваться логарифмическим представлением эффективности экранирования:

$$K_E = 20 \lg \frac{E_0}{E_1}, \text{ dB},$$
$$K_H = 20 \lg \frac{H_0}{H_1}, \text{ dB},$$

где  $K_E$  - коэффициент ослабления (экранирования) по электрической составляющей,  $K_H$  - коэффициент ослабления (экранирования) по магнитной составляющей,  $E_0(H_0)$  – напряженность электрической (магнитной) составляющей поля в отсутствии экрана,  $E_1(H_1)$  – напряженность электрической (магнитной) составляющей поля при наличии экрана в той же точке пространства.

Теоретическое решение задачи экранирования, определение значений напряженности полей в общем случае чрезвычайно затруднительно, поэтому в зависимости от типа решаемой задачи представляется удобным рассматривать отдельные виды экранирования: электрическое, магнитостатическое и электромагнитное. Последнее является наиболее общим и часто применяемым, так как в большинстве случаев экранирования приходится иметь дело либо с переменными, либо с флуктуирующими и реже – действительно со статическими полями.

### ***Подавление емкостных паразитных связей***

Емкостная паразитная связь между двумя электрическими цепями возникает через ближнее электрическое поле. Для снижения паразитной емкости между электрическими цепями вводится токопроводящий экран, соединенный с общим проводом и замыкающий на общий провод большую часть электрических силовых линий.

Введением экрана, имеющего сопротивление, равное нулю относительно общего провода, теоретически наводку можно снизить до нуля. Практически же всегда из-за наличия проводников и технологических отверстий и возникновения краевых эффектов имеется остаточное ближнее электрическое поле и, следовательно, остаточная емкость.

При экранировании электрического поля очень важно создать низкое сопротивление экрана относительно корпуса (общего провода). Появление любого сопротивления, особенно индуктивного, в цепи соединения экрана с общим проводом создает эффект паразитной связи через посторонний провод, поэтому все металлические элементы конструкции всегда должны тщательно соединяться между собой и с общим проводом.

### ***Подавление индуктивных паразитных связей***

Паразитная индуктивная связь возникает между двумя электрическими цепями через ближнее магнитное поле. Для снижения величины магнитных полей используют магнитостатическое экранирование.

Магнитостатическое экранирование или экранирование шунтированием магнитного поля основано на применении экранов из ферромагнитных материалов с большой магнитной проницаемостью. Линии магнитного поля как бы втягиваются в материал с более высокой магнитной проницаемостью, в результате внутри экрана поле ослабляется. Эффективность магнитостатического экранирования зависит от магнитного сопротивления экрана.

### **Экранирование линий связи**

---

Наилучшую защиту как от электрического, так и от магнитного полей обеспечивают информационные линии связи типа экранированного бифиляра, трифиляра (трех скрученных вместе проводов из которых один используется в качестве электрического экрана), триаксиального кабеля (изолированного коаксиального кабеля, помещенного в электрический экран), экранированного плоского кабеля (плоского многопроводного кабеля, покрытого с одной или обеих сторон медной фольгой). Чтобы уменьшить уровень ПЭМИ, необходимо особенно тщательно выполнять соединение оболочки провода (экрана) с корпусом аппаратуры. Вместе с тем соединение оболочки провода



с корпусом в одной точке не ослабляет в окружающем пространстве магнитное поле, создаваемое протекающим по проводу током. Для экранирования магнитного поля необходимо создать поле такой же величины и обратного направления. С этой целью необходимо весь обратный ток экранируемой цепи направить через экранирующую оплетку провода. Для полного осуществления этого принципа необходимо, чтобы экранирующая оболочка была единственным путем для протекания отраженного тока.

Высокая эффективность экранирования обеспечивается при использовании витой пары, защищенной экранирующей оболочкой.

На низких частотах приходится использовать более сложные схемы экранирования - коаксиальные кабели с двойной оплеткой (триаксиальные кабели).

На более высоких частотах, когда толщина экрана значительно превышает глубину проникновения поля, необходимость в двойном экранировании отпадает. В этом случае внешняя поверхность играет роль электрического экрана, а по внутренней поверхности протекают обратные токи.

Экранированные провода и кабели следует применять в основном для соединения отдельных блоков и узлов друг с другом.

Кабельные экраны выполняются в форме цилиндра из сплошных оболочек в виде спирально намотанной на кабель плоской ленты или в виде оплетки из тонкой проволоки. Экраны однослойные и многослойные.

Материал: свинец, сталь, медь, алюминий или их сочетание.

В области низких частот корпуса многоштырьковых низкочастотных разъемов являются экранами и должны быть надежно заземлены.

В области высоких частот коаксиальные кабели должны быть согласованы по волновому сопротивлению и иметь высокочастотные разъемы.

Наиболее экономичным способом экранирования информационных линий связи между устройствами ТС'ПИ считается групповое размещение их в экранирующем распределительном коробе.

### **Экранированные помещения**

---

Экранироваться могут не только отдельные блоки аппаратуры и их соединительные линии, но и помещения в целом (рис. 9).

В обычных (неэкранированных) помещениях основной экранирующий эффект обеспечивают железобетонные стены домов. Экранирующее свойство дверей и окон хуже. Для повышения экранирующих свойств стен применяются дополнительные средства, в том числе:

- токопроводящие лакокрасочные покрытия или токопроводящие обои;
- шторы из металлизированной ткани;
- металлизированные стекла (например, из двуокиси олова), устанавливаемые в металлические или металлизированные рамы.



Рис. 9. Экранированное помещение

Экранировку электромагнитных волн более 100 дБ можно обеспечить только в специальных экранированных камерах (рис. 9), в которых электромагнитный экран выполнен в виде электрогерметичного стального корпуса, а для ввода электрических коммуникаций используются специальные фильтры.

Таким образом, экранированием электромагнитных волн возможно полностью обеспечить электромагнитную безопасность объекта. Однако обеспечение требований по электромагнитной безопасности объекта, особенно в части, касающейся защиты информации от утечки по техническим каналам, созданным с применением специального оборудования (электроакустический канал, радиоканал, канал побочных электромагнитных излучений и наводок и т.д.), необходимо предусматривать на стадии разработки проекта объекта. Так, например, при проектировании в пределах объекта необходимо выделить зоны повышенной конфиденциальности - комнаты переговоров, технологические помещения, в которых циркулирует информация, предназначенная для служебного пользования, и т.п. В таких

помещениях не должно быть окон, они должны иметь независимую систему электропитания, экранированные двери. При строительстве такого объекта возможно применение экранирующих материалов – шунгитобетона или бетона с электропроводящим наполнителем. Стены помещения отделываются гибкими экранами, например ткаными коврами из аморфных материалов или электропроводящими тканями. В качестве экранирующей ткани возможно применение различных углетканей или металлизированных пленок. С внутренней стороны помещение облицовывается конструкционным радиопоглощающим материалом для предотвращения образования стоячих электромагнитных волн с частотами более 1 ГГц и для создания более комфортной экологической обстановки. В качестве радиопоглощающих материалов могут быть использованы специализированное пеностекло различных марок или сотовые конструкции. Коэффициент экранирования такого помещения может превышать 60 дБ в широком диапазоне частот.

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Какое явление называют вихревыми токами?
2. Какие токи называют токами Фуко? Почему?
3. В каких случаях появляются токи Фуко?
4. Каким образом изменяется распределение магнитного потока в магнитопроводе при возникновении вихревых токов?
5. Какое явление называется скин-эффектом?
6. Какое явление называется магнитным скин-эффектом?
7. Каким образом можно уменьшить величину вихревых токов?
8. Приведите правило Ленца в применении к направлению вихревых токов.
9. Приведите примеры использования на практике токов Фуко.
10. Приведите примеры вредного, нежелательного воздействия вихревых токов.
11. Назовите основные пути возникновения нежелательных связей между двумя электрическими цепями.
12. В каком виде представляется нежелательная связь между двумя электрическими цепями через ближнее магнитное поле?
13. В каком виде представляется нежелательная связь между двумя электрическими цепями через ближнее электрическое поле?
14. Какие элементы цепи могут играть роль случайных антенн?
15. Какие элементы цепи могут оказаться в роли общего сопротивления, создающего нежелательную связь между двумя электрическими цепями?
16. Что такое заземление?
17. С какой целью выполняется защитное заземление?
18. Укажите способы уменьшения паразитной емкости, взаимной индуктивности и паразитного сопротивления?
19. Какой способ защиты от возникновения нежелательных связей электрических цепей называется экранированием?
20. Какой формулой выражается эффективность экранирования?
21. Каким образом применяют экранирование для снижения паразитной емкости?
22. В чем состоит магнитостатическое экранирование?
23. Что такое триаксиальный кабель?
24. Какой кабель называется витой парой?

25. Каким образом можно сформулировать требования к разъемам электрических кабелей с точки зрения исключения нежелательных электромагнитных связей?
26. С какой целью производят экранирование помещений?
27. Какие помещения целесообразно экранировать?

### ***Уровень курса***

1. Природа возникновения вихревых токов. Эффекты, сопровождающие явление вихревых токов.
2. Нежелательные излучения технических средств обработки информации. Нежелательные электромагнитные связи.
3. Нежелательные связи электрических цепей через ближнее электрическое и магнитное поля.
4. Нежелательные связи электрических цепей через общее сопротивление.
5. Применение экранирования и развязывающих цепей для устранения нежелательных связей электрических цепей.
6. Подавление емкостных и индуктивных паразитных связей.
7. Экранирование линий связи.

## Лекція № 11

**Тема:** Физические основы создания активных помех и обнаружения радиозакладных устройств.

**Оглавление**

Создание активных помех.....	3
Пространственное и линейное зашумление.....	3
Способы предотвращения утечки информации через побочные электромагнитные излучения и наводки ПК.....	4
Средства создания маскирующих помех в сетях электропитания ..	5
Обнаружение радиозакладных устройств .....	6
Физические основы функционирования закладных устройств .....	6
Радиомикрофоны .....	8
Основные признаки излучения радиозакладок.....	9
Применение индикаторов (детекторов) поля для поиска радиозакладных устройств.....	10
Функционирование панорамных приемников при поиске радиозакладных устройств.....	11
Физические явления, используемые в работе нелинейных радиолокаторов.....	12
Выявление технических средств с передачей информации по токоведущим линиям.....	14
Контрольные вопросы по теме .....	15
Уровень модуля.....	15
Уровень курса.....	16

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2–07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Создание активных помех

---

### *Пространственное и линейное зашумление*

Экранирование и фильтрация относятся к пассивным методам защиты. Когда экранирование и фильтрация недостаточно эффективны, то прибегают к активным методам защиты, основанным на создании помех техническими средствами, что снижает отношение сигнал/шум. Технические средства создания электромагнитных маскирующих помех (генераторы шума) делятся на средства пространственного и линейного зашумлений.

Технические средства пространственного зашумления предназначены для маскировки информативных побочных электромагнитных излучений и наводок персональных ЭВМ и периферийных устройств, а также другой оргтехники посредством создания помех в широкой полосе частот (как правило, от 1 до 1000 МГц). Однако серьезным недостатком их применения является создание непреднамеренных помех широкому классу радиоэлектронных устройств, расположенных в непосредственной близости от передатчика маскирующих излучений. Так, например, генератор пространственного зашумления делает невозможным прием пейджинговых сообщений, телевизионных программ, парализует работу мобильной связи и т. д. То есть применение данной аппаратуры может быть затруднено в связи с ограничениями по электромагнитной совместимости.

Система пространственного зашумления должна обеспечивать:

- излучение электромагнитных помех в диапазоне частот возможных побочных излучений технических средств приема, обработки и хранения информации (ТСПИ);
- нерегулярную структуру помех;
- уровень создаваемых помех должен обеспечивать минимальное значение соотношения сигнал/шум;
- за счет выбора типа антенны помехи должны иметь горизонтальную и вертикальную поляризацию.

В системах пространственного зашумления в основном используются помехи типа «белого шума» или «синфазные помехи».

«Синфазные помехи» в основном применяются для защиты ЭВМ. В них в качестве помехового сигнала используются импульсы случайной амплитуды, совпадающие по форме и времени существования с импульсами полезного сигнала. Вследствие этого по своему спектральному составу помеховый сигнал аналогичен спектру побочных электромагнитных излучений ПЭВМ. То есть, сигнал зашумления генерирует «имитационную



помеху», по спектральному составу соответствующему спектральному сигналу.

Широкополосный сигнал помехи «белый шум» имеет равномерно распределенный энергетический спектр во всем рабочем диапазоне, существенно превышающий уровни побочных излучений. Такие системы применяются для защиты ЭВМ, систем звукоусиления и звукового сопровождения, систем внутреннего телевидения.

Системы линейного зашумления применяются для маскировки наведенных опасных сигналов в посторонних проводниках и соединительных линиях вспомогательных технических средств и систем (ВТСС), выходящих за пределы контролируемой зоны.

В простейшем случае система линейного зашумления представляет собой генератор шумового сигнала, формирующий шумовое маскирующее напряжение с заданными спектральными, временными и энергетическими характеристиками, который гальванически подключается в зашумляемую линию (посторонний проводник). На практике наиболее часто подобные системы используются для зашумления линий электропитания (осветительной и розеточной сети).

### ***Способы предотвращения утечки информации через побочные электромагнитные излучения и наводки ПК***

В качестве технических способов исключения возможностей перехвата информации за счет побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) ПК можно перечислить следующие:

- доработка устройств вычислительной техники (ВТ) с целью минимизации уровня излучений;
- электромагнитная экранировка помещений, в которых расположена вычислительная техника;
- активная радиотехническая маскировка (зашумление).

Используя различные радиопоглощающие материалы и схемотехнические решения при доработке устройств ВТ удастся существенно снизить уровень излучений ВТ. Стоимость подобной доработки зависит от размера требуемой зоны безопасности и колеблется в пределах 20-70% от стоимости ПК. Электромагнитная экранировка помещений в широком диапазоне частот является сложной технической задачей, требует значительных капитальных затрат и не всегда возможна по эстетическим и эргономическим соображениям. Активная радиотехническая маскировка предполагает формирование и излучение в непосредственной близости от ВТ маскирующего сигнала.

Различают энергетический и неэнергетический методы активной маскировки. При энергетической маскировке с помощью генераторов шума излучается широкополосный шумовой сигнал с уровнем, существенно превышающим во всем частотном диапазоне уровень излучений ПК. Одновременно происходит наводка шумовых колебаний в отходящие цепи.

Возможности энергетической активной маскировки могут быть реализованы только в случае, если уровень излучений ПК существенно меньше норм на допускаемые радиопомехи от средств ВТ. В противном случае устройство активной энергетической маскировки будет создавать помехи различным радиоустройствам, расположенным поблизости от защищаемого средства ВТ.

Неэнергетический (статистический) метод активной маскировки заключается в изменении вероятностной структуры сигнала, принимаемого приемником злоумышленников, путем излучения специального маскирующего сигнала. Исходной предпосылкой в данном методе является случайный характер электромагнитных излучений ПК. Для описания этих излучений используется теория марковских случайных процессов. В качестве вероятностных характеристик применяются матрицы вероятностей переходов и вектор абсолютных вероятностей состояний. Сформированный с помощью оригинального алгоритма сигнал излучается в пространство компактным устройством, которое может устанавливаться как на корпусе самого ПК, так и в непосредственной близости от него. Уровень излучаемого этим устройством маскирующего сигнала не превосходит уровня информативных электромагнитных излучений ПК, поэтому согласования установки маскирующего устройства со службой радиоконтроля не требуется. Более того, подобные устройства в отличие от устройств активной энергетической маскировки не создают ощутимых помех для других электронных приборов, находящихся рядом с ними, что также является их неоспоримым преимуществом.

Следует отметить, что в случаях: доработки устройств ВТ, электромагнитной экранировки помещений и активной энергетической маскировки – показателем защищенности является отношение сигнал/шум, обеспечиваемое на границе минимально допустимой зоны безопасности. Максимально допустимое отношение сигнал/шум рассчитывается в каждом конкретном случае по специальным методикам.

### ***Средства создания маскирующих помех в сетях электропитания***

Для защиты электросетей переменного тока 220 В, 50 Гц от их несанкционированного использования для передачи перехваченной с

помощью специальных технических средств речевой информации используются сетевые генераторы шума.

Устройство конструктивно представляет собой задающий генератор «белого» шума, усилитель мощности и блок согласования выхода с сетью 220 В. Как правило, используется диапазон 50-500 КГц, но иногда он расширяется и до 10 МГц. Данные генераторы шума являются эффективным средством борьбы с техническими средствами негласного съема информации. В некоторых случаях используется комбинированная аппаратура обнаружения и подавления (генератор включается в режим подавления при превышении ВЧ-сигнала в электросети выше установленного порога).

### **Обнаружение радиозакладных устройств**

---

#### ***Физические основы функционирования закладных устройств***

Один из эффективных путей негласного получения коммерческой информации основан на применении так называемых закладных устройств (ЗУ), скрытно устанавливаемых в местах возможного нахождения объектов наблюдения (конкурентов) либо подключаемых к используемым ими каналам связи. В настоящее время создано огромное количество типов таких устройств, различающихся принципом функционирования, способом передачи информации, дальностью действия, а также размером и внешним оформлением.

Самые миниатюрные ЗУ имеют вес всего в 1,5 г и линейные размеры – 2-5 миллиметров. Дальность передачи информации с таких устройств едва превышает 10 м. Более мощные устройства имеют размеры до нескольких сантиметров и позволяют осуществить передачу перехватываемой информации на дальность от нескольких сот до тысячи и более метров. Обычно ЗУ скрытно устанавливаются в элементах конструкций зданий и интерьера, крепятся под одеждой или камуфлируются под личные вещи.

В радиозакладках для передачи информации используется энергия электромагнитных волн, не влияющих на органы чувств человека, способных распространяться на значительные расстояния, преодолевая естественные и искусственные препятствия. Благодаря этим двум свойствам радиозакладные устройства позволяют с помощью специальной приемной аппаратуры вести скрытное наблюдение за интересующим объектом практически из любой удаленной точки.

С технической точки зрения, закладки могут работать практически в любом диапазоне радиоволн. Однако из конструктивных соображений наиболее используемые частоты от 100 до 1000 МГц.

Закладки с передачей информации по токоведущим линиям используют свойство электрических сигналов распространяться на значительные расстояния по проводникам. Такие ЗУ обладают существенными достоинствами: высокой скрытностью передачи информации, большой дальностью действия, отсутствием необходимости в дополнительных источниках питания. Кроме того, они хорошо камуфлируются под элементы электрических цепей и токоприемники (розетки, тройники, электрические удлинители, настольные лампы и т. д.). В качестве токопроводящих линий используются либо специально проложенные провода, либо кабели электрических и телефонных сетей.

По наличию устройства управления закладные устройства условно разделяют на три группы:

- с непрерывным излучением;
- с дистанционным управлением;
- с автоматическим включением при появлении сигнала.

ЗУ с непрерывным излучением наиболее просты в изготовлении, дешевы и предназначены для получения информации в течение ограниченного промежутка времени. Работа на излучение таких ЗУ начинается с момента подключения питания. Если источник питания автономный, то, как правило, время работы такого ЗУ не превышает 1-2 часа из-за большого потребления энергии на передачу сигнала. Время работы ЗУ, питающихся от линий (силовых или телефонных), практически неограниченно.

Однако общим существенным недостатком для всех ЗУ с непрерывным излучением является возможность их обнаружения по излучению.

Существенно увеличить время непрерывной работы устройств с автономным питанием и повысить скрытность позволяет применение дистанционного управления ЗУ. Оно позволяет переводить устройство в режим излучения только в тех случаях, когда объект наблюдения ведет переговоры либо передает информацию по каналам связи.

Время излучения может быть дополнительно сокращено, если закладка содержит устройство накопления и сжатия сигнала.

Другим способом увеличения времени работы закладки является использование устройств автоматического включения передатчика при появлении сигнала (акустического либо электрического в линии).

Устройства включения от голоса называются акустоматами. Иногда их называют системами VAS или VOX. Закладка, оборудованная таким устройством, в обычном (дежурном) режиме работает как акустический приемник, потребляя незначительный ток. При появлении сигнала, например, в начале разговора объекта наблюдения с кем-либо, подается напряжение на

передатчик, и тот переходит в режим излучения. При пропадании акустического сигнала (прекращении разговора) через определенное время, обычно несколько секунд, передатчик выключается, и закладка переходит в режим дежурного приема. Применение акустомата позволяет в несколько раз увеличить время работы закладного устройства. Однако их использование приводит к потере первых слов при каждом включении.

### **Радиомикрофоны**

Принцип действия радиозакладок микрофонного типа основан на преобразовании акустических сигналов с помощью микрофона в электрические сигналы и передачи их по радиоканалу на приемное устройство. Такие подслушивающие устройства получили наибольшее распространение благодаря простоте исполнения и дешевизне. В качестве источника питания могут служить автономные источники питания, электрическая и телефонная сети. В состав радиозакладок микрофонного типа входят следующие устройства:

- микрофон, воспринимающий акустические колебания разговаривающих лиц и превращающий их в электрические сигналы;
- радиопередатчик, воспринимающий электрические сигналы от микрофона и передающий их по радиолинии на приемник, позволяющий злоумышленнику воспринимать содержание переговоров;
- источник питания радиопередатчика, определяющий продолжительность непрерывной работы радиозакладок.

Микрофон определяет зону акустической чувствительности (до 20-30 м), радиопередатчик – дальность действия радиолинии. Важными параметрами с точки зрения дальности действия для передатчика являются мощность, стабильность несущей частоты, диапазон частот, вид модуляции.

По конструктивному исполнению радиозакладки могут быть простыми, работающими как обычные передатчики с амплитудной или частотной модуляцией. В то же время радиозакладки могут быть и весьма сложными: иметь в своем составе устройства дистанционного управления, автоматического включения при определенных условиях, системы накопления информации и передачи ее короткими сериями на повышенных скоростях и т.д.

Радиозакладки, устанавливаемые в телефонную линию, используют её и в качестве источника питания, и в качестве антенны. Некоторые позволяют прослушивать только телефонные разговоры, а некоторые ещё и разговоры в

помещении, где установлен телефонный аппарат. При разговоре акустические волны воздействуют на телефонный капсюль, и он передает сигналы по сети, даже если трубка положена. При поднятии трубки закладка переходит в режим прослушивания телефонного разговора. Так как питается такая закладка от телефонной линии, то время её работы практически не ограничено.

### **Основные признаки излучения радиозакладок**

**Первый** признак – относительно высокий уровень излучения, обусловленный необходимостью передачи сигнала за пределы контролируемого помещения. Этот уровень тем выше, чем ближе к закладному устройству (ЗУ) находится аппаратура поиска.

**Второй** – наличие гармоник в излучении радиозакладок. Это обстоятельство является следствием необходимости минимизации размеров ЗУ, а следовательно, невозможности обеспечить хорошую фильтрацию выходного излучения. В современных радиозакладках ослабление излучений на гармониках составляет всего 40-50 дБ, поэтому обнаружение этих нежелательных излучений без особых проблем возможно на удалении до 10 м. естественно, если позволяет частотный диапазон применяемого приемника контроля.

**Третий** – появление нового источника в обычно свободном частотном диапазоне. При этом оператор, осуществляющий радиоконтроль, должен очень хорошо ориентироваться в общей радиоэлектронной обстановке и знать, что и в каких диапазонах может работать.

**Четвертый** связан с использованием в ряде радиозакладок направленных антенн. Это приводит к сильной локализации излучения, то есть существенной неравномерности его уровня в пределах контролируемого объекта. На расстояниях в несколько метров этот эффект лучше всего проявляется для гармоник основного излучения.

**Пятый** признак связан с особенностями поляризации излучения радиозакладок. Дело в том, что при изменении пространственного положения или ориентации приемной антенны наблюдается изменение уровня всех источников. Однако однотипные удаленные источники одного диапазона ведут себя примерно одинаково, тогда как сигнал закладки изменяется отлично от остальных.

**Шестой** признак заключается в изменении («размывании») спектра излучений радиомикрофонов при возникновении каких-либо шумов в контролируемом помещении. Он проявляется только в том случае, если ЗУ работает без кодирования передаваемой информации.

**Седьмой** признак связан со способностью человека различать акустические сигналы. Так, если закладка работает без маскирования, то

оператор, осуществляющий поиск ЗУ, слышит шум помещения или тот тестовый сигнал, который сам создал. В аппаратном варианте этот эффект обыгрывается разного рода корреляторами и, так называемой, акустической завязкой. При выявлении закладок с маскированием передаваемой информации сигнал напоминает неразборчивую речь или какофонию, если в качестве тестовых используются, соответственно, речевой сигнал или музыка. В последнем случае для аппаратного выявления необходимы специальные алгоритмы корреляции, но обычно можно обойтись и просто зондированием импульсными акустическими сигналами. Наконец, при применении кодирования, скорее всего, оператор будет слышать белый шум, и скорее всего никакая корреляция со звуком в данном случае не поможет.

**Восьмой** признак связан со временем работы радиозакладок. Так, самые простые из них, то есть не оборудованные схемами дистанционного включения и VOX, будут функционировать непрерывно в течение некоторого времени. Для закладок с VOX характерен прерывистый режим работы днем и практически полное молчание ночью. Устройства с дистанционным включением обязательно имеют несколько коротких сеансов в течение дня и почти наверняка будут работать во время переговоров, важных с точки зрения установившего их лица. Применительно к телефонным закладкам наличие восьмого признака проверяется очень просто: если какое-либо излучение возникает одновременно с поднятием трубки и исчезает, когда трубка положена, то это излучение прямо или косвенно связано с утечкой информации.

Вышеприведенный список признаков не является исчерпывающим и может быть существенно расширен.

### ***Применение индикаторов (детекторов) поля для поиска радиозакладных устройств***

Простейшими средствами обнаружения факта использования радиозакладок являются индикаторы, или детекторы поля. По сути, это приемники с очень низкой чувствительностью, поэтому они обнаруживают излучения радиозакладных устройств на предельно малых расстояниях (10-40 см), чем и обеспечивается селекция «нелегальных» излучений на фоне мощных «разрешенных» сигналов. Важное достоинство детекторов – способность находить передающие устройства вне зависимости от применяемой в них модуляции. Основной принцип поиска состоит в выявлении абсолютного максимума уровня излучения в помещении. Хорошие индикаторы поля снабжены частотомерами, акустическими динамиками, имеют режим прослушивания и двойную индикацию уровня сигнала.

Иногда детекторы используют и в так называемом сторожевом режиме. В этом случае после полной проверки помещения на отсутствие ЗУ фиксируется уровень поля в некоторой точке пространства (обычно это стол руководителя или место ведения переговоров), и прибор переводится в дежурный режим. В случае включения закладки (примерно на удалении до двух метров от детектора), индикатор выдает сигнал о повышении уровня электромагнитного поля. Однако необходимо учитывать тот факт, что если будет использоваться радиозакладка с очень низким уровнем излучения, то детектор скорее всего не зафиксирует ее активизацию.

В некоторых случаях (при наличии достаточного времени) можно даже составить карту помещения, зафиксировав характерные уровни излучения в каждой точке пространства. Для достижения данной цели особенно удобны детекторы, снабженные цифровой индикацией уровня.

Так как индикаторы поля должны реагировать на уровень электромагнитного излучения, то в них применяют амплитудные детекторы, которые дают дополнительный эффект, позволяющий прослушивать сигналы от радиозакладок с амплитудной модуляцией.

### ***Функционирование панорамных приемников при поиске радиозакладных устройств***

Радиоприемные устройства, безусловно, являются более сложным и более надежным средством выявления радиозакладок, чем индикаторы поля и частотомеры. Однако для того, чтобы быть пригодными к решению задач поиска, они должны удовлетворять трем основным условиям:

- иметь возможность настройки на частоту работы устройств, скрытно передающих перехваченную информацию;
- обладать функциями выделения нужного сигнала по характерным признакам на фоне мешающих сигналов и помех;
- обладать способностью к демодуляции различных видов сигналов.

Задача приемника состоит в том, чтобы «вырезать» из всего многообразия частот интервал, соответствующий спектру принимаемого сигнала и «подавлять» все, что находится за его пределами. Качество выполнения этой операции характеризуется так называемой избирательностью.

С физической точки зрения звук человеческой речи представляет собой акустические колебания воздуха, частота которых не превышает нескольких килогерц. Передавать их на большие расстояния невозможно, поэтому с помощью микрофонов эти колебания преобразуют в электрические, после чего применяют так называемую модуляцию. При осуществлении процесса



модуляції сигнал звукової частоти як би совмещают с высокочастотным радиосигналом, и последний переносит полезную информацию в точку приема. Отсюда и название «несущая» для высокочастотного излучения. «Слияние» двух типов колебаний осуществляется за счет того, что по закону, диктуемому низкочастотным сигналом, меняется какой-нибудь параметр высокочастотного. Когда изменяется амплитуда, то модуляция называется амплитудной (АМ), когда частота - частотной (ЧМ) и т. д.

Указанное изменение (модуляция) приводит к тому, что передатчик излучает не одну частоту  $f_0$  своего генератора, а целый набор, который включает в себя не только несущую, но и все частоты звукового сигнала, расположенные справа и слева от несущей в полосе  $\Delta f_{cn}$ . Весьма характерным является и вид спектра радио закладных устройств, в которых применено цифровое кодирование передаваемой информации. Огибающая спектра такого высокочастотного излучения описывается функциональной зависимостью, известной как  $\sin(x)/x$ .

Весь диапазон рабочих частот приемника разбивается на поддиапазоны, то есть участки, в пределах которых можно плавно изменять частоту настройки. В панорамных системах таких поддиапазонов приходится делать более десятка. Переход с одного поддиапазона на другой осуществляется заменой ВЧ-фильтра. Изменение частоты настройки в пределах диапазона производится путем изменения параметров элементов, входящих в состав фильтра или контура гетеродина. Поиск сигнала ведется с применением специальных алгоритмов.

### **Физические явления, используемые в работе нелинейных радиолокаторов**

Одной из наиболее сложных задач в области защиты информации является поиск внедренных ЗУ, не использующих радиоканал для передачи информации, а также радиозакладок, находящихся в пассивном (неизлучающем) состоянии. Традиционные средства выявления такие, как панорамные радиоприемники, анализаторы спектра или детекторы поля в этом случае оказываются неэффективны. Визуальный осмотр также не гарантирует обнаружение подобных ЗУ, так как современные технологии позволяют изготавливать их с любым видом камуфляжа, прятать в элементах строительных конструкций и интерьера.

Именно эта проблема и привела к появлению совершенно нового вида поискового прибора, получившего название нелинейного радиолокатора. Своим названием он обязан заложенному физическому принципу выявления подслушивающих устройств.

Дело в том, что технические средства промышленного шпионажа являются радиоэлектронными устройствами. В их состав входят полупроводниковые элементы (диоды, транзисторы, микросхемы), для которых характерен нелинейный вид вольтамперной характеристики, связывающей протекающий через  $p-n$  переход электрический ток  $I$  с приложенным напряжением  $U$ .

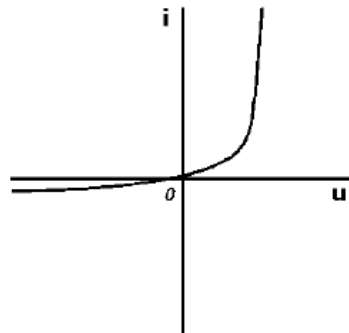


Рис. 1. Характеристика  $p-n$  перехода

Наличие такой нелинейной связи приводит к возникновению на выходе полупроводникового прибора бесконечно большого количества переменных напряжений (гармоник) с частотами  $f_n = n \times f_0$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$  (любое натуральное число), а  $f_0$  – частота зондирующего сигнала, действующего на входе полупроводникового прибора. Сам факт возникновения сигнала с частотой  $f_0$  на входе полупроводникового элемента обязан явлению наведения ЭДС и токов в случайных антеннах, которыми могут оказаться проводники печатных плат или другие компоненты ЗУ при облучении их внешним высокочастотным сигналом.

Таким образом, нелинейный локатор – это прибор, который просто реализует следующий принцип: излучает электромагнитную волну с частотой  $f_0$ , а принимает переизлученные сигналы на частотах  $f_n$ . Если такие сигналы будут обнаружены, то в зоне действия локатора есть полупроводниковые элементы, и их необходимо проверить на возможную принадлежность к ЗУ.

В соответствии с вышесказанным нелинейный радиолокатор обнаруживает только радиоэлектронную аппаратуру и в отличие от классического линейного радиолокатора «не видит» отражений от окружающих предметов, то есть обладает высокой избирательностью.

Источниками помех для его работы могут служить контакты со слабым прижимом, для которых характерно наличие промежуточного окисного слоя (сваленные вместе металлические канцелярские скрепки, монеты: плетеные сетки) или просто подвергнутые коррозии металлы. В редких случаях (при

большой мощности излучения) нежелательный эффект могут дать паяные и сварные соединения.

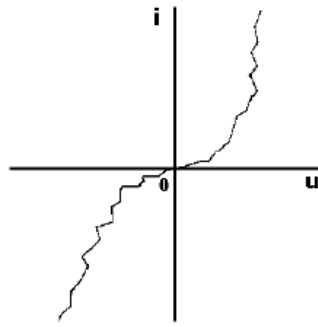


Рис. 2. Характеристика случайного МОМ-перехода

Причина возникновения указанных помех связана с тем, что слабые металлические контакты, как правило, представляют собой квазинелинейные элементы с неустойчивым  $p-n$  переходом, вызванным наличием окислов на поверхности металлов. В физике полупроводников подобные структуры известны как «металл - окисел - металл», а нелинейные элементы такого типа называются МОМ-структурами. Вольтамперная характеристика случайного соединения в отличие от характеристики  $p-n$  перехода обычно симметрична. Примерный вид ее показан на рис. 2.

### ***Выявление технических средств с передачей информации по токоведущим линиям***

Выявление технических средств с передачей информации по токоведущим линиям осуществляется с использованием специальных адаптеров, позволяющих подключаться к различным линиям, в том числе и находящимся под напряжением до 300-400 В. Поиск необходимо производить в частотном диапазоне 50-300 кГц. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, на частотах ниже 50 кГц в сетях электропитания относительно высок уровень помех от бытовой техники и промышленного оборудования, а с другой – на частотах выше 300 кГц существенно затухание сигнала в линии, и, кроме того, провода начинают работать как антенны, излучающие сигнал в окружающее пространство, поэтому устройства с частотами передачи 300 кГц и выше будут выявлены на этапе поиска радиозакладок. Некоторое оборудование, питаемое от сети, может производить характерный низкочастотный шум, который может быть принят за искомый сигнал «жучка», поэтому необходимо по очереди отключать все питаемые устройства, чтобы определить источник такого шума.

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Укажите назначение технических средств пространственного зашумления.
2. В каком диапазоне частот создаются помехи при выполнении пространственного зашумления?
3. Какой основной недостаток энергетического пространственного зашумления?
4. В чем состоит преимущество применения синфазных маскирующих помех вместо белого шума?
5. Выполнение каких функций и какие параметры должна обеспечивать система пространственного зашумления?
6. Что такое синфазные помехи?
7. Каким образом можно создать маскирующую помеху?
8. Что представляет собой простейшая система линейного зашумления?
9. С какой целью применяются системы линейного зашумления?
10. Какие параметры (размер, дальность передачи сигнала, зона акустической чувствительности) имеют радиозакладные устройства микрофонного типа?
11. Какие диапазоны частот радиоволн используют радиозакладные устройства?
12. В чем состоят преимущества применения закладных устройств с передачей информации по токоведущим линиям?
13. Каким образом классифицируют закладные устройства по способу управления их включением?
14. В достоинства и недостатки закладных устройств с непрерывным излучением?
15. Что такое система VOX?
16. Какой вид модуляции используют в радиозакладных устройствах для передачи информационного сигнала?
17. Назовите основные признаки излучения радиозакладок.
18. Что представляет собой простейший индикатор поля для поиска радиозакладных устройств?
19. Почему приемник с очень низкой чувствительностью обладают способностью обнаруживать радиозакладные устройства?
20. Что такое сторожевой режим применения детекторов поля?
21. Какими свойствами должен обладать радиоприемник для поиска радиозакладных устройств?

22. Почему для передачи речевой информации необходимо использовать модуляцию сигнала?
23. В каких случаях применяются нелинейные радиолокаторы?
24. Какой тип связи входа и выхода полупроводникового прибора приводит к появлению гармоник на его выходе?
25. Каким образом добиваются появления излучения от радиозакладных устройств?
26. Каким образом функционирует нелинейный локатор?
27. Какие явления приводят к появлению помех при работе нелинейного локатора?
28. При помощи каких устройств выявляют наличие технических средств с передачей информации по токоведущим линиям?
29. На каких частотах производится несанкционированная передача информации по токоведущим линиям?

### ***Уровень курса***

1. Физические основы создания активных помех: пространственное и линейное зашумление.
2. Физические основы функционирования закладных устройств.
3. Основные признаки излучения радиозакладных устройств.
4. Применение индикаторов (детекторов) поля для поиска радиозакладных устройств.
5. Функционирование панорамных приемников при поиске радиозакладных устройств.
6. Физические явления, используемые в работе нелинейных радиолокаторов.

## Лекція № 12

**Тема:** Электромагнитный спектр. Тепловое излучение. Инфракрасное оптическое излучение.

**Оглавление**

Электромагнитный спектр .....	2
Физические основы теплового излучения.....	4
Демаскирующие признаки объектов в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра .....	6
Принцип действия тепловизионной аппаратуры.....	7
Принцип действия приборов ночного видения (ПНВ) .....	8
Контрольные вопросы по теме .....	11
Уровень модуля.....	11
Уровень курса.....	12

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2–07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Электромагнитный спектр

В зависимости от частоты (или длины волны в вакууме), а также способа излучения и регистрации различают несколько видов электромагнитных волн: радиоволны, оптическое излучение, рентгеновское излучение и гамма-излучение.

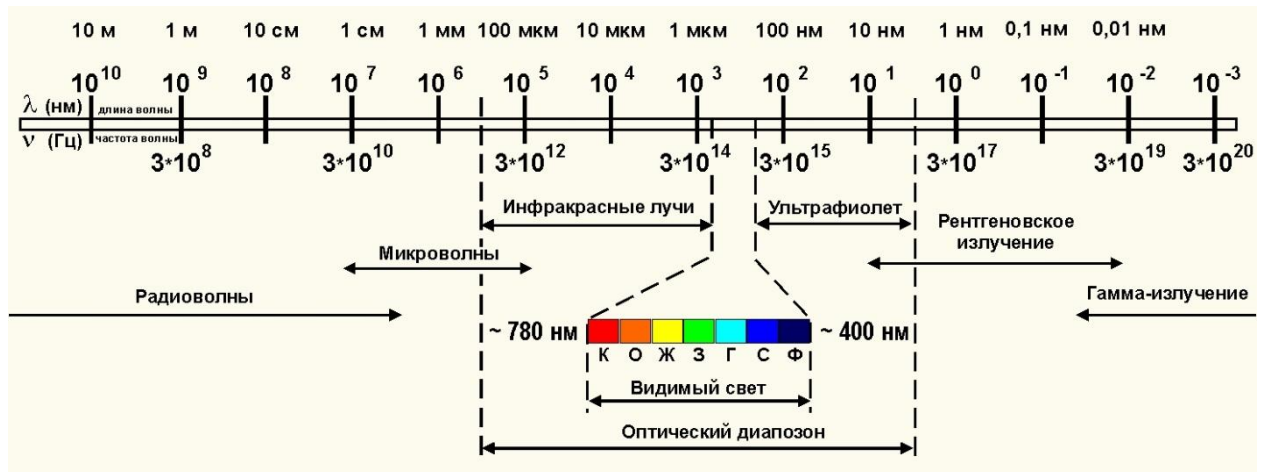


Рис. 1 Диапазоны спектра электромагнитных волн

**Радиоволнами** называют электромагнитные волны, длина которых в вакууме  $\lambda > 1 \cdot 10^{-4}$  м (соответственно, частота меньше  $3 \cdot 10^{12}$  Гц).

В связи с особенностями распространения и генерации весь диапазон длин волн и частот принято делить на 9 диапазонов, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Диапазон	Длина волны	Частота
Сверхдлинные волны (СДВ)	100 – 10 км	3 – 30 кГц
Длинные волны (ДВ)	10 – 1 км	30 – 300 кГц
Средние волны (СВ)	1000 – 100 м	0,3– 3 МГц
Короткие волны (КВ)	100 – 10 м	3 – 30 МГц
Ультракороткие волны (УКВ):		
– метровые	10 – 1 м	30 – 300 МГц
– дециметровые	10 – 1 дм	0,3 – 3 ГГц
– сантиметровые	10 – 1 см	3 – 30 ГГц
– миллиметровые	10 – 1 мм	30 – 300 ГГц
– субмиллиметровые	1 – 0,1 мм	0,3– 3 ТГц

Волны ультракороткого диапазона также называют сверхвысокочастотными (СВЧ-радиоволны).

В следующей таблице приведены некоторые примеры используемых диапазонов радиоволн.

Таблица 2

Название	Полоса частот	Длины волн
Диапазон средних волн (MW)	530–1610 кГц	565,65–186,21 м
Диапазон коротких волн	5,9–26,1 МГц	50,8–11,49 м
Гражданский диапазон	26,965–27,405 МГц	11,118–10,940 м
Телевизионные каналы: с 1 по 5	48–100 МГц	6,25–3,00 м
Кабельное телевидение	100–174 МГц	
Телевизионные каналы: с 6 по 12	174–230 МГц	1,72–1,30 м
Кабельное телевидение	230–470 МГц	
Телевизионные каналы: с 21 по 39	470–622 МГц	6,38–4,82 дм
Диапазон ультракоротких волн (UKW)	62–108 МГц	1 м
ISM-диапазон	2–4 ГГц	15–7,5 см
Диапазоны военных частот	29.50–31.75 МГц	
Диапазоны частот гражданской авиации	108–136 МГц	

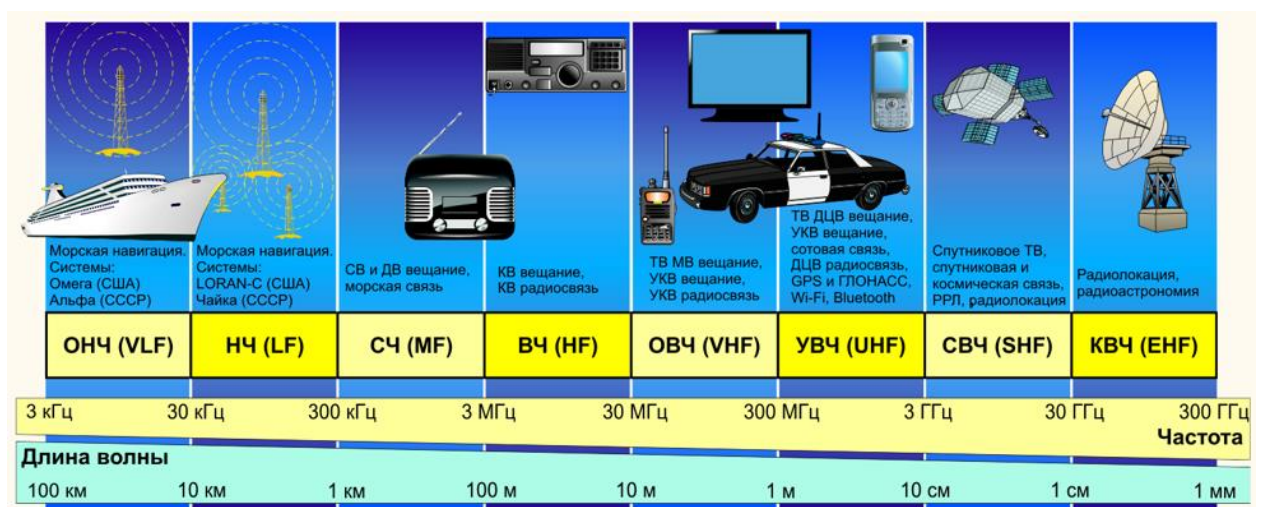


Рис. 2 Применение радиоволн различных диапазонов частот

Частотный диапазон ISM является той частью радиочастотного спектра общего назначения, которая может быть использована без лицензирования.



Единственное требование для разрабатываемых продуктов в ISM-диапазоне – это соответствие нормам, которые устанавливаются регулируемыми органами для данной части частотного спектра. Эти правила различаются в разных странах. В США нормы устанавливает Федеральная комиссия по связи (Federal Communication Commission, FCC), а в Европе – Европейский институт стандартов по телекоммуникациям (European Telecommunication Standards Institute, ETSI). В этой области частот работают устройства беспроводной связи на основе стандартов Bluetooth, Wi-Fi, 802.15.4 и Zigbee и др.

**Оптическим излучением**, или **светом**, называют электромагнитные волны, длины которых в вакууме лежат в диапазоне от 10 нм до 1 мм (границы условны). К оптическому излучению относят инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения.

**Инфракрасным излучением** (ИК) называют электромагнитное излучение, длины волн которого в вакууме лежат в пределах от 1 мм до 770 нм.

**Видимым излучением** (видимым светом) называют электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме от 380 до 770 нм, которое способно непосредственно вызывать зрительное ощущение в человеческом глазе.

**Ультрафиолетовым излучением** (УФ) называют электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме от 380 до 10 нм.

**Рентгеновским излучением** (рентгеновскими лучами) называют электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме, лежащими в диапазоне с условными границами от 10–100 нм до 0,01–1 нм.

**Гамма-излучением** (гамма-лучами) называют электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме менее 0,1 нм.

### **Физические основы теплового излучения**

---

Инфракрасное излучение испускается всеми нагретыми телами. Инфракрасное излучение занимает широкий диапазон длин волн от 0,76 до 1000 мкм. Весь диапазон инфракрасного излучения условно делят на три области:

- ближняя:  $\lambda = 0,74\text{--}2,5$  мкм;
- средняя:  $\lambda = 2,5\text{--}50$  мкм;
- далёкая:  $\lambda = 50\text{--}2000$  мкм.

Длинноволновую окраину этого диапазона иногда выделяют в отдельный диапазон электромагнитных волн – терагерцевое излучение (субмиллиметровое излучение).

На практике часто используются два спектральных диапазона 3 ... 5 и 8 ... 14 мкм, совпадающие с окнами максимальной прозрачности атмосферы и являющиеся наиболее информативными.

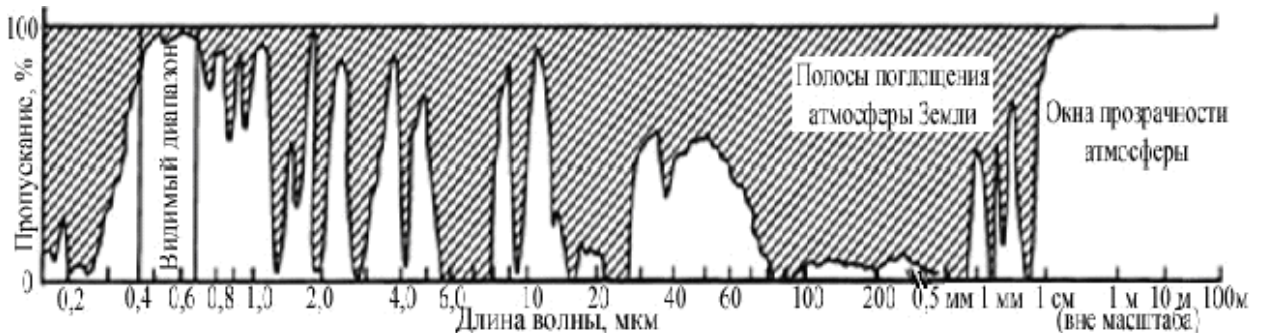


Рис. 3 Степень прозрачности атмосферы в оптическом диапазоне

Спектр, мощность и пространственные характеристики этого излучения зависят от температуры тела и его излучательной способности, обусловленной, в основном, его материалом и микроструктурными характеристиками излучающей поверхности. Например, шероховатые поверхности излучают сильнее, чем зеркальные. При повышении температуры мощность излучения быстро растет, а ее максимум сдвигается в область более коротких длин волн. Эта закономерность характеризуется законом смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T_k} \text{ [мкм]}$$

Следовательно, объект (в том числе и кожный покров человека) с температурой около 300 К (30 °С) имеет максимум излучения на длине волны 10 мкм, солнце при  $T_{\text{эфф}} = 6000^\circ\text{С} - 0,5 \text{ мкм}$ , а жидкий азот с  $T_{\text{кип}} = 77\text{К} - 38 \text{ мкм}$ . Спектр излучения может быть непрерывным или дискретным.

Характер спектра зависит, в основном, от агрегатного состояния вещества. Для твердых и жидких тел, как правило, характерны непрерывные спектры излучения, а для газообразных линейчатые, которые при больших давлениях или больших толщинах чаще переходят в непрерывный.

Для характеристики теплового излучения удобным оказалось понятие абсолютного черного тела (АЧТ), т.е. тела, поглощающего все падающее на него излучение. Излучение АЧТ описывается аналитически, оно является функцией только его температуры. Физической моделью АЧТ может служить замкнутая полость с отверстием, значительно меньшим ее габаритов.

Законы изучения АЧТ могут применяться с известной поправкой для большинства реальных тел, что определяет их значение.

Суммарную плотность потока излучения АЧТ в зависимости от его температуры определяет закон Стефана Больцмана:

$$R(T) = \sigma T^4, \quad \text{Вт/м}^2$$

где  $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана Больцмана.

Для реальных тел законы излучения АЧТ применимы только в первом приближении. Их излучение может отличаться от излучения АЧТ при той же температуре как спектральным составом, так и интенсивностью. Тела, излучение которых имеет тот же спектр, что и излучение АЧТ при данной температуре, и отличается от него только интенсивностью, называются серыми.

Для оценки излучательной способности реальных (серых) тел вводят понятие коэффициента излучения  $\varepsilon(\lambda, T) \leq 1.0$ . Для АЧТ и серых тел  $\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$ , т.е., коэффициент излучения равен коэффициенту поглощения реального тела.

### **Демаскирующие признаки объектов в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра**

---

К демаскирующим признакам объектов в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра относятся: собственное (естественное) излучение нагретых тел и отраженное объектами (искусственное) ИК-излучение. Естественные источники ИК-излучений бывают наземными (почва, лес и т.д.), атмосферными (облака, атмосферные газы) и космическими (солнце, луна, звезды). Естественные источники ИК-излучений создают фоновое излучение, затрудняющее распознавание объектов

Обнаружение цели возможно за счет различий в тепловой излучательной способности объекта и фона. Каждый предмет при температуре, отличной от абсолютного нуля, испускает электромагнитное излучение, называемое тепловым. Излучение тел зависит от их температуры и излучательной способности, которые можно характеризовать эффективной температурой тела. Собственное тепловое излучение нагретых тел связано с понятием абсолютно черного тела, поглощающего все падающие на него излучения во всем спектре. Распределение интенсивности излучения по спектру для абсолютно черных тел подчиняется закону Планка. Максимальное значение спектральной яркости излучения наблюдается на длине волны  $\lambda_{\text{макс}}$ , определяемой по закону Вина.

Отраженное объектами ИК излучение в дневное время в основном приходится на Солнце и доля собственного излучения является пренебрежительно

малой, в то время как в ночное время преобладающим является собственное излучение.

Ослабление ИК-излучения в атмосфере обусловлено полосами поглощения водяных паров, углекислого газа и озона, а также рассеиванием излучения. При проведении разведки и мероприятий по защите объектов необходимо учитывать ослабление собственного или отраженного ИК-излучения в атмосфере за счет рассеяния согласно формуле:

$$P_1 = P_0 e^{-\beta x}$$

где  $P_1$  – поток излучения, прошедший через слой рассеивающей среды;  $P_0$  – падающий на рассеивающий слой поток излучения;  $\beta$  – коэффициент рассеивания;  $x$  – толщина рассеивающего слоя.

Поток энергии, прошедший через ослабляющий слой атмосферы, можно представить как результат излучения при температуре, меньше эффективной.

Большая часть энергии излучения подвижных объектов лежит в диапазоне волн 2-14 мкм; окна прозрачности находятся в этом же диапазоне, что позволяет обнаруживать цели на сравнительно больших дальностях.

Опытным образом установлено, что в диапазоне длин волн менее 3 мкм преобладает отраженное и рассеянное солнечное излучение. В диапазоне длин волн более 4 мкм преобладающим является собственное тепловое излучение фонов.

В реальных условиях внешнее тепловое поле человека неравномерно по интенсивности излучения, сложно по спектральному составу и, кроме того, может существенно изменяться в зависимости от рода деятельности, климатических и метеорологических условий.

### **Принцип действия тепловизионной аппаратуры**

В основу принципа действия тепловизионных приборов положено двухмерное преобразование собственного теплового излучения от объектов и местности, или фона, в видимое изображение. Наличие в поле зрения регистрируемого теплового контраста позволяет визуализировать на мониторе полутоновые черно-белые, или адекватные им «псевдоцветные», тепловизионные изображения.

Тепловизионная техника обладает рядом достоинств и присущих только ей возможностей: обнаружение удаленных только теплоизлучающих объектов (или целей) независимо от уровня естественной освещенности, а также до определенной степени тепловых и других помех (дождя, тумана, снегопада, пыли, дыма и др.).

Как правило, тепловизоры строятся на основе специальных матричных датчиков температуры – болометров. Они представляют собой матрицу миниатюрных тонкопленочных терморезисторов. Инфракрасное излучение, собранное и сфокусированное на матрице объективом тепловизора, нагревает элементы матрицы в соответствии с распределением температуры наблюдаемого объекта. Пространственное разрешение коммерчески доступных болометрических матриц достигает 1280x720 точек. Коммерческие болометры обычно делают неохлаждаемыми для уменьшения цены и размеров оборудования.

Существуют также сканирующие тепловизоры. В них система из движущихся зеркал последовательно проецирует на датчик излучение от каждой точки наблюдаемого пространства. Датчик может быть одноэлементным, линейкой чувствительных элементов или небольшой матрицей. Для увеличения чувствительности и снижения инерционности датчики сканирующих тепловизоров охлаждают до криогенных температур. Лучшие охлаждаемые датчики способны реагировать на единичные фотоны и имеют время реакции менее микросекунды.

Температурное разрешение современных тепловизоров достигает сотых долей градуса Цельсия.

Различают наблюдательные и измерительные тепловизоры. Наблюдательные тепловизоры показывают только градиенты температур объекта. Измерительные тепловизоры позволяют измерить значение температуры заданной точки объекта с точностью до коэффициента излучения материала объекта. Измерительные тепловизоры требуют периодической калибровки, для чего зачастую снабжены встроенным устройством для калибровки матрицы, обычно в виде шторки, температура которой точно измеряется. Шторка периодически надвигается на матрицу, давая возможность откалибровать матрицу по температуре шторки.

### **Принцип действия приборов ночного видения (ПНВ)**

---

Оптико-механические приборы позволяют вести наблюдение при освещенности близкой к нормальной (в светлое время суток) и при удовлетворительных погодных условиях (ясно или слабая дымка). Когда условия наблюдения затруднены – это вечернее или ночное время суток, чердаки, подвалы и т. п. применяются так называемые приборы ночного видения и тепловизоры, работающие в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн или в среднем диапазоне.

В ближнем ИК нет естественных источников оптического излучения кроме солнца, поэтому в полной темноте ПНВ не смогут функционировать без

специальной подсветки. Для таких ПНВ существуют источники подсветки (инфракрасные прожекторы, например на базе инфракрасных светодиодов), не видимые невооружённым глазом. Эти приборы по своему принципу построения не относятся к тепловизионной аппаратуре. По существу, они представляют собой высокочувствительные видеокамеры.

Наблюдение в среднем (тепловом) инфракрасном диапазоне: в этом диапазоне излучают все твёрдые тела, нагретые до температур от  $-50$  градусов Цельсия и выше. ПНВ, работающие в этом диапазоне, воспринимают разницу между температурой объекта и температурой фона и не требуют подсветки.

В практике проведения наблюдений с целью несанкционированного снятия оптической информации высокочувствительные тепловизионные приборы, требующие охлаждения, называют тепловизорами. Более простые приборы, без охлаждения, называют приборами ночного видения. Применение тепловизоров с охлаждением в интересах промышленного шпионажа не распространено, так как при применении по целевому назначению их преимущества незначительны, а по массогабаритным характеристикам они существенно уступают приборам ночного видения. Так, например, переносной тепловизор Д-4 имеет габариты  $195 \times 212 \times 260$  мм и массу 3.4 кг. Для сравнения: тепловизионный датчик V3900 (GEC-Masrconi Ltd - Великобритания) имеет массу около 32 кг.

Главными достоинствами приборов ночного видения являются:

- возможность наблюдения объекта в полной темноте или в условиях слабой освещенности;
- меньшее по сравнению с видимой областью спектра затухание электромагнитных волн ИК-диапазона в осадках.

К недостаткам приборов следует отнести:

- значительно худшую разрешающую способность, связанную с большой длиной волны (человека, например, можно опознать только по силуэту, так как черты лица не распознаются);
- нечувствительность человеческого глаза к ИК-излучению.

Для того чтобы объединить достоинства оптико-механических приборов и ИК-приборов и устранить (уменьшить) недостатки последних приборы ночного видения строятся по схеме, изображенной на рис. 4.

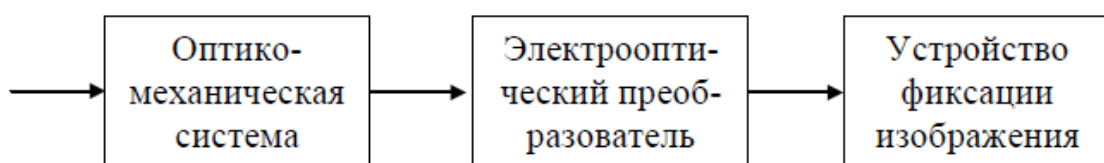


Рис. 4. Структурная схема прибора ночного видения

Оптико-механическая система определяет такие характеристики прибора, как мгновенный угол поля зрения и кратность увеличения. Применяют объективы из материалов, прозрачных в соответствующей спектральной области. Стекло или кварц применяют при изготовлении объективов для работы в ближней зоне ИК. Для средней зоны ИК применяют объективы из фтористого лития или фтористого бария, а также часто используют германиевую оптику или халькогенидное стекло.

Электрооптический преобразователь преобразует ИК-излучение в видимое, выводя его на небольшой встроенный экран. Эта часть устройства принципиально не работает без источника электрического питания, что можно отнести к еще одному из недостатков приборов ночного видения. В качестве устройства фиксации изображения обычно выслушает человеческий глаз или фотоаппарат.

Приборы ночного видения могут работать как в пассивном, так и в активном режиме. Пассивный режим применяется при наличии собственного излучения объекта наблюдения и в условиях слабого рассеянного излучения случайных искусственных или естественных источников, уровень которого превышает  $10^{-5}$  люкс. Активный режим используется в условиях полного отсутствия освещения. Он сопровождается применением источника подсветки объекта наблюдения. Таким источником может быть лазер, например полупроводниковый или на стекле с неодимом, или специальный ИК-прожектор. Прожекторы с мощностью излучения до 100-120 Вт функционируют, как правило, от автономных источников с напряжением питания 12 В. Диапазон расстояний, подсвечиваемых такими прожекторами, варьируется в диапазоне 10-110 м в зависимости от мощности источника и ширины луча, вид последнего формируется специальными насадками.

При ведении наблюдения с использованием приборов ночного видения в активном режиме учитываются следующие факторы:

- оптимальная дальность ведения наблюдения составляет несколько десятков метров:
- в поле зрения прибора не должно быть ярких источников света, так как их излучение может «ослепить» прибор или даже вывести из строя:
- работать в активном режиме следует только в том случае, если точно известно, что объект наблюдения не использует приборы ночного видения, иначе активное ПНВ будет обнаружено.

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Какие виды электромагнитных волн вам известны?
2. Расположите виды электромагнитных волн в порядке возрастания частоты излучения.
3. Расположите виды электромагнитных волн в порядке возрастания длины волны.
4. Расположите диапазоны радиоволн в порядке возрастания частоты излучения.
5. Расположите диапазоны радиоволн волн в порядке возрастания длины волны.
6. Какое электромагнитное излучение носит название "радиоволны"?
7. Приведите несколько примеров использования радиоволн и укажите диапазоны, которые в этих случаях занимают эти радиоволны.
8. Укажите пределы оптического диапазона электромагнитных волн.
9. Какая часть оптического диапазона относится к инфракрасному излучению?
10. Какая часть оптического диапазона относится к видимому излучению?
11. Какая часть оптического диапазона относится к ультрафиолетовому излучению?
12. Укажите границы диапазонов рентгеновского и гамма излучений.
13. На какие три области разделяется диапазон инфракрасного излучения? Приведите границы этих областей.
14. От каких факторов зависит спектр и мощность инфракрасного излучения тела?
15. Запишите формулу закона смещения Вина.
16. Какие вещества имеют линейчатый спектр излучения?
17. Твердые тела имеют непрерывный или линейчатый спектр излучения?
18. Какое название носит объект, при помощи которого описывают излучение тел?
19. Какое тело называют абсолютно черным?
20. Как отличается спектр серого тела от абсолютно черного?
21. Какой коэффициент вводят для оценки излучательной способности реальных (серых) тел?
22. Запишите формулу закона Стефан-Больцмана.
23. Назовите демаскирующие признаки объектов в инфракрасном диапазоне.
24. Назовите источники фонового инфракрасного излучения.



25. Назовите преимущества тепловизионной техники.
26. Что называется болометром?
27. Чем отличаются наблюдательные тепловизоры от измерительных?
28. Чем принципиально отличается проведение наблюдений в ближнем и в среднем диапазоне инфракрасного излучения?
29. В чем преимущество приборов ночного видения по сравнению с тепловизорами, использующими охлаждение датчиков?
30. Каковы основные недостатки приборов ночного видения?
31. Почему приборы ночного видения имеют меньшую разрешающую способность, чем оптические приборы?
32. Можно ли применять стеклянные объективы для проведения наблюдений в средней области инфракрасного диапазона?
33. Что такое активный и что такое пассивный режим работы прибора ночного видения?
34. На каком расстоянии действуют инфракрасные прожекторы?
35. Какие факторы следует учитывать при работе прибора ночного видения в активном режиме?

### ***Уровень курса***

1. Электромагнитный спектр.
2. Физические основы теплового излучения.
3. Демаскирующие признаки объектов в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра.
4. Принцип действия тепловизионной аппаратуры.
5. Принцип действия приборов ночного видения.

## Лекція № 13

**Тема:** Оптическое видимое излучение.

**Оглавление**

Видимое излучение.....	2
Основы оптической радиометрии. ....	2
Взаимодействие оптического излучения и вещества.....	4
Отражение света.....	5
Поглощение света .....	6
Рассеяние света.....	7
Преломление света.....	8
Цветовое зрение .....	9
Демаскирующие признаки объектов в видимом диапазоне электромагнитного спектра .....	11
Контрольные вопросы по теме .....	14
Уровень модуля.....	14
Уровень курса.....	14

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2–07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Видимое излучение

---

Оптическим излучением (ОИ), или светом, называют электромагнитные волны, длины которых в вакууме лежат в диапазоне от 10 нм до 1 мм (границы условны). К оптическому излучению относят инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения.

Видимым излучением (видимым светом) называют электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме от 380 до 770 нм, которое способно непосредственно вызывать зрительное ощущение в человеческом глазе.

Возникновение ОИ связано с движением электрически заряженных частиц (электроны, атомы, ионы, молекулы). Дискретные спонтанные или индуцированные переходы носителей зарядов с более высоких на более низкие уровни энергии сопровождаются испусканием световых квантов (фотонов) с энергией, равной разности энергий этих уровней. Энергия фотона  $E = h\nu$ , где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка;  $\nu$  – частота излучения, Гц.

Скорость распространения ОИ в вакууме  $c_0 = 299792,5$  км/с. В реальных средах ОИ распространяется со скоростью  $v = c_0/n = \lambda_0\nu/n = \lambda\nu$ , где  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  – показатель преломления среды;  $\epsilon$  и  $\mu$  – соответственно относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;  $\lambda_0$  и  $\lambda$  – соответственно длина волны света в вакууме и среде.

## Основы оптической радиометрии.

---

Основной характеристикой ОИ является поток излучения (мощность светового потока)  $\Phi = dQ/dt$ , где  $Q$  – энергия, Дж;  $t$  – время, с. Наиболее распространенная единица измерения потока излучения – Ватт (Вт).

*Поверхностной плотностью* излучения  $M_e$ , или энергетической светимостью, называется отношение испускаемого поверхностью по одну сторону от себя, т.е. в полусфере, полного лучистого потока к площади этой поверхности

$$M_e = \frac{d\Phi}{dS_1}, \text{ Вт/м}^2$$

*Облученностью*, или энергетической освещенностью  $L$ , называется отношение лучистого потока  $d\Phi$ , падающего нормально на какую-либо поверхность, к площади этой поверхности  $dS_2$ , т.е.

$$E_e = \frac{d\Phi}{dS_2}, \text{ Вт/м}^2.$$

*Силой излучения*, или энергетической силой света, называется отношение лучистого потока  $d\Phi$  к телесному углу  $d\omega$ , в пределах которого он распространяется, т.е.

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\omega}, \text{ Вт/ср.}$$

Это соотношение действительно для точечного источника излучения, т.е. тела, имеющего малые размеры по сравнению с расстояниями, на которых рассматривается его действие.

*Энергетической яркостью* излучающей поверхности в данном направлении называется отношение измеренной в этом направлении энергетической силы света к видимой площади излучающей поверхности, т.е.

$$L_{e\alpha_1} = \frac{dI_{e\alpha_1}}{dS_{1\alpha_1}}$$

где  $dI_{e\alpha_1}$  – сила излучения в данном направлении  $\alpha_1$ ;  $dS_{1\alpha_1}$  – видимая площадь элемента поверхности  $dS_1$  в направлении, образующем угол  $\alpha_1$  с нормалью к элементу  $dS_1$ .

Качественными характеристиками вышеуказанных величин являются их спектральные характеристики, такие, например, как спектральная интенсивность плотности излучения  $r_\lambda$ , являющаяся величиной плотности излучения, приходящейся на интервал  $\lambda \dots (\lambda + \Delta\lambda)$ , или спектральная плотность яркости  $b_\lambda$ . Связь между интегральными и спектральными характеристиками выражается как

$$M_e = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda, \text{ или } L_e = \int_0^\infty b_\lambda d\lambda$$

Если оценивают мощность лучистой энергии по производимому ею световому ощущению, то переходят к световому потоку и соответствующим световым единицам.

Определения световых единиц аналогичны определениям соответствующих энергетических.

В видимой области спектра применяют систему световых единиц, соответствующую зрительному ощущению лучистых потоков с учетом спектральной чувствительности глаза. Единицей светового потока является люмен (1 лм = 1/683 Вт для  $\lambda = 0,55$  мкм), сила света измеряется в канделах (кд), освещенность  $E$  – в люксах (лк), яркость – кд/м<sup>2</sup> (1 кд = лм/ср, 1 лк = 1 лм/м<sup>2</sup>).

Человеческий глаз неодинаково чувствителен к излучению различных длин волн. Если измерить лучистый поток в диапазоне длин волн  $\lambda \dots (\lambda + \Delta\lambda)$

для какого-нибудь излучателя и световой поток, т.е. поток, воспринимаемый глазом в том же диапазоне спектра, то отношение светового потока  $dF_\lambda$  к лучистому потоку  $d\Phi_\lambda$  называется коэффициентом видности

$$K_\lambda = \frac{dF_\lambda}{d\Phi_\lambda}$$

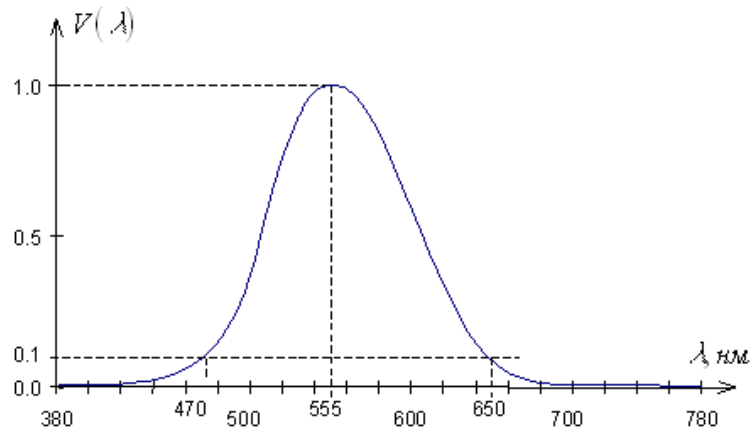


Рис.1. Зависимость коэффициента относительной видности от длины волны

Отношение коэффициента видности для какой-либо длины волны излучения  $\lambda$  к максимальному значению  $K_\lambda$  называется коэффициентом относительной видности

$$V_\lambda = \frac{k_\lambda}{k_{\lambda \max}}$$

Величину  $k_{\lambda \max}$  называют также световым эквивалентом лучистого потока. В качестве численного значения принято  $k_{\lambda \max} = 683$  [лм/Вт].

### Взаимодействие оптического излучения и вещества

По спектральным свойствам материалы обычно разделяют на металлы, полупроводники и диэлектрики. Металлы характеризуются высокой отражательной способностью, особенно в ИК-области спектра, наличием точки температурной инверсии, увеличением излучательной способности в УФ-диапазоне. Их оптические свойства определяются в основном проводимостью.

Для полупроводников характерно наличие поглощения в УФ- и ИК-областях спектра, а также сильная зависимость оптических свойств от температуры.

Для диэлектриков характерно наличие зон прозрачности в широком диапазоне спектра с резкой границей поглощения.

Важнейшая особенность оптических свойств газов - селективность поглощения излучения. Форма и положение линий испускания (поглощения) газов сильно зависят от их концентрации и температуры.

При взаимодействии ОИ с веществом имеет место его поглощение, рассеяние, отражение и преломление.

Обозначим через  $F_{0\lambda}$  падающий на вещество монохроматический поток ОИ;  $F_{a\lambda}$  - поглощенный средой поток;  $F_{\rho\lambda}$  - отраженный поток;  $F_{m\lambda}$  - рассеянный поток;  $F_{\tau\lambda}$  - вышедший из среды поток.

На основании закона сохранения энергии

$$F_{0\lambda} = F_{a\lambda} + F_{\rho\lambda} + F_{m\lambda} + F_{\tau\lambda}$$

$$\text{Величины } \alpha_{\lambda} = F_{a\lambda}/F_{0\lambda}; \quad \rho_{\lambda} = F_{\rho\lambda}/F_{0\lambda}; \quad m_{\lambda} = F_{m\lambda}/F_{0\lambda}; \quad \tau_{\lambda} = F_{\tau\lambda}/F_{0\lambda}$$

называются соответственно спектральными коэффициентами поглощения, отражения, рассеяния и пропускания. Они показывают, какую долю от падающего потока составляют поглощенный, отраженный, рассеянный и прошедший через среду лучистые потоки.

### **Отражение света**

---

Отражением света (ОС) называется эффект возвращения световой волны при ее падении на границу раздела двух сред обратно в первую среду. Различают зеркальное, диффузное и смешанное ОС.

*Зеркальное* ОС имеет место, если неровности поверхности малы по сравнению с длиной волны света. При этом свет отражается по законам геометрической оптики, т.е. угол падения равен углу отражения, а падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности в точке падения света.

*Диффузное* ОС сопровождается равномерным распределением отраженного света в пределах полусферы. Оно характерно для поверхности с неровностями порядка длины волны света, расположенными беспорядочно.

*Смешанное* ОС наблюдается при отражении от поверхностей с неровностями, большими длины волны света. Для него характерно преимущественное отражение в направлении зеркального ОС в сочетании с менее интенсивной диффузионной компонентой. Регулярные неоднородности поверхности приводят к появлению пространственного распределения отраженного света, характерного для явления дифракции.

ОС обычно носит селективный характер, что и определяет цветность различных тел.

ОС от гладкой поверхности диэлектрика в сильной степени зависит от поляризации падающего света и угла падения. При падении неполяризованного света на гладкую поверхность под углом Брюстера

$$i_B = \arctg(1/n)$$

где  $n$  - показатель преломления среды, отраженное излучение становится полностью поляризованным в плоскости, параллельной плоскости падения. При падении света на гладкую поверхность раздела двух сред из среды с большим показателем преломления наблюдается полное внутреннее отражение (ПВО) при углах больших

$$i_{ПВО} \geq \arcsin(n_1/n_2)$$

При этом коэффициент отражения от гладкой поверхности рассчитывают по формулам Френеля, связывающим его значение с углами падения, показателями преломления сред и состоянием поляризации падающего света. Коэффициент отражения от гладкой поверхности поглощающих сред (металлы, полупроводники) рассчитывают с использованием комплексного показателя преломления, учитывая поглощения в веществе.

Распределение отраженного света в пространстве, особенно при смешанном ОС, описывается с помощью индикатрисы коэффициента отражения. Иногда для характеристики рассеивателей используют понятие *коэффициента яркости* ( $\beta$ ), т.е. отношение яркости ( $L$ ) конкретного объекта в заданном направлении к яркости ( $L_0$ ) идеального рассеивателя.

### Поглощение света

---

Поглощение света (ПС) - уменьшение энергии световой волны в веществе вследствие преобразования ее во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного излучения (люминесценция), имеющего иной спектральный состав и иные направления распространения.

Для твердых веществ характерно собственное поглощение, обусловленное взаимодействием света с кристаллической решеткой, и характеристическое (селективное) поглощение, возникающее вследствие колебаний и вращений молекул и приводящее к появлению полос резонансного поглощения.

Газы обладают в основном избирательным поглощением.

Ослабление монохроматического света в гомогенной изотропной среде за счет поглощения описывается законом Бугера

$$F_{\alpha\lambda} = F_{0\lambda} \exp(-a_\lambda X)$$

где  $X$  - длина пути света в среде;  $F_{0\lambda}$  - падающий поток;  $F_{\alpha\lambda}$  - поток, прошедшего сквозь среду;  $a_\lambda$  - спектральный показатель поглощения среды,  $\text{мм}^{-1}$ ;

$$a_{\lambda} = 4\pi k/\lambda$$

где  $k$  - главный показатель поглощения среды.

Ослабление полихроматического излучения определяют интегрированием соответствующих потоков по длинам волн.

### **Рассеяние света**

---

Рассеяние света (РС) – преобразование света веществом, сопровождающееся изменением направления его распространения, поляризации и (в общем случае) частоты.

РС обусловлено его дифракцией на оптических неоднородностях среды, зависит от их размеров, концентрации и комплексного показателя преломления.

Существует большое количество разновидностей эффекта РС. Рассеяние Рэлея происходит без изменения частоты света, наблюдается при прохождении света через скопление частиц с размерами, меньшими длины его волны.

Рассеяние света может происходить на электронах среды (явление Комптона), молекулах вещества (комбинационное рассеяние), флуктуации плотности среды (рассеяние Мандельштама-Бриллюена). Рассеяние Тиндаля характерно для мутных сред с размерами частиц порядка долей длины волны света, а рассеяние Ми – для сред с частицами, размеры которых составляют несколько длин волн света.

В мощном лазерном излучении наблюдаются нелинейные эффекты – вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюена (ВРМБ) и др.

Для каждого вида рассеяния характерна своя индикатриса рассеяния. Например, при рассеянии Рэлея, Тиндаля индикатриса имеет симметричный характер, а при рассеянии Ми – резко выраженную асимметрию. Для слабо мутных сред (вода, чистый воздух, стекло) характерно малоугловое рассеяние, т.е. яркость пучка в направлении падающего на среду света значительно больше его яркости в иных направлениях.

Для сильно рассеивающих сред (молочное стекло и т.п.) характерно изотропное рассеяние.

В первом приближении ослабление ОИ за счет рассеяния может быть описано зависимостью, аналогичной закону Бугера

$$F_{m\lambda} = F_{0\lambda} \exp(-r_{\lambda} X)$$

где  $r_{\lambda}$  – коэффициент ослабления излучения за счет рассеяния.



Суммарное ослабление света веществом за счет рассеяния и поглощения определяется *коэффициентом экстинкции*  $\gamma_\lambda = r_\lambda + a_\lambda$ , вводимым в формулу закона Бугера.

### Преломление света

---

При падении пучка лучей света на границу раздела однородных гладких прозрачных сред часть его отражается под углом  $\alpha_1$ , равным углу падения, другая же часть проходит во вторую среду под углом  $\alpha_2$ , определяемым законом преломления

$$\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = n_{21}$$

Константа  $n_{21}$  есть относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой и определяется отношением скоростей света в этих средах. Абсолютный показатель преломления  $n_a$  есть отношение скорости света в вакууме к его скорости в среде. Очевидно, что

$$n_{21} = n_{2a} / n_{1a}$$

Чаще всего в технике определяют показатель преломления среды к воздуху

$$n_a = n_{\text{возд}} n_{21}$$

При нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре  $n_{\text{возд}} = 1,00027$ . При условиях измерений, отличных от нормальных, вводят поправку для реальных значений температуры, давления и влажности воздуха.

Показатель преломления определяется природой вещества и зависит от внешних условий, особенно от температуры и длины волны света. Принято указывать индексами значения температуры и длины волны света, при которых измерен показатель преломления.

Различают изотропные и анизотропные материалы. У первых (стекла, жидкости, газы) показатель преломления не зависит от направления света при измерениях. Анизотропные материалы (кристаллы и др.) характеризуются двойным лучепреломлением, т.е. расщеплением луча на два, распространяющихся с разными скоростями. Скорость одного из них ("необыкновенного") зависит от направления. Анизотропия наблюдается и у изотропных в обычных условиях веществ при сжатии и других воздействиях.

Показатель преломления зависит от плотности вещества. Функция показателя преломления  $f(n)$  обычно прямо пропорциональна плотности:

$$f(n) = rd$$

где  $r$  - постоянная, характерная для конкретного вещества, называемая удельной рефракцией;  $d$  – плотность.

*Дисперсия* – это зависимость показателя преломления от длины волны света. Обычно при увеличении частоты показатель преломления увеличивается (нормальная дисперсия), однако в окрестности полос поглощения среды наблюдается аномальная дисперсия. Дисперсию оценивают разностью показателей преломления каких-либо длин волн  $n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}$ .

## Цветовое зрение

---

Цвет – свойство света вызывать определенное зрительное ощущение в соответствии со спектральным составом отражаемого или испускаемого излучения. В зависимости от длины волны света выделяют три группы цветов: длинноволновую (красный, оранжево-красный, оранжевый), средневолновую (желтый, желто-зеленый, зеленый) и коротковолновую (голубой, синий, фиолетовый).

Цвета разделяют на хроматические и ахроматические. Хроматические цвета обладают тремя основными качествами: цветовым тоном, который зависит от длины волны светового излучения; насыщенностью, зависящей от доли основного цветового тона и примесей других цветовых тонов; яркостью цвета, то есть степенью близости его к белому цвету. Различное сочетание этих качеств дает большое разнообразие оттенков хроматического цвета. Ахроматические цвета (белый, серый, черный) различаются лишь яркостью.

При смешении двух спектральных цветов с разной длиной волны образуется результирующий цвет. Каждый из спектральных цветов имеет дополнительный цвет, при смешении с которым образуется ахроматический цвет – белый или серый. Многообразие цветовых тонов и оттенков может быть получено оптическим смешением всего трех основных цветов – красного, зеленого и синего. Количество цветов и их оттенков, воспринимаемых глазом человека, необычайно велико и составляет несколько тысяч.

Физиология цветового зрения недостаточно изучена. Из предложенных гипотез и теорий цветовое зрение наибольшее распространение получила трехкомпонентная теория, основные положения которой впервые были сформулированы Юнгом (T. Young, 1802) и Г. Гельмгольцем (1866). Согласно трехкомпонентной теории Юнга – Гельмгольца в сетчатке глаза имеется три воспринимающих аппарата (рецептора, элемента), которые возбуждаются в разной степени под действием световых раздражителей различной длины волны (спектральная чувствительность глаза). Каждый вид рецептора возбуждается преимущественно одним из основных цветов – красным, зеленым или синим, однако в определенной степени реагирует и на другие

цвета. Поэтому кривые спектральной чувствительности отдельных видов цветовоспринимающих рецепторов частично накладываются друг на друга. Изолированное возбуждение одного вида рецептора вызывает ощущение основного цвета. При равном раздражении всех трех видов рецепторов возникает ощущение белого цвета. В глазу происходит первичный анализ спектра излучения рассматриваемых предметов с отдельной оценкой участия в них красной, зеленой и синей областей спектра. В коре головного мозга происходит окончательный анализ и синтез светового воздействия, которые осуществляются одновременно. Благодаря такому устройству зрительного анализатора человек может достаточно хорошо различать множество цветовых оттенков.

Трехкомпонентную теорию цветового зрения подтверждают данные морфофизиологических исследований. Спектрофотометрические исследования позволили определить спектры поглощения различных типов одиночных фоторецепторных клеток. По данным Доу (N. W. Daw, 1981), зрительные пигменты колбочек сетчатки человека имеют следующие максимумы спектров поглощения: красночувствительные – 570–590 нм, зеленочувствительные – 535 – 555 нм и синечувствительные – 440–450 нм. Современные электрофизиологические исследования органа зрения показали, что каждому из трех цветовых раздражителей соответствует определенный вид биопотенциала сетчатки и зрительной области коры головного мозга.

Имеются также другие теории цветового зрения, не получившие, однако, широкого признания.

У человека различают ночное, или скотопическое, зрение, сумеречное, или мезопическое, и дневное, или фотопическое, зрение (см.). Это обусловлено прежде всего наличием в сетчатке глаза человека двух видов фоторецепторов – колбочек и палочек, что послужило основой для обоснования теории двойственности зрения. Колбочки располагаются, главным образом, в центральном отделе сетчатки и обеспечивают фотопическое зрение – воспринимают форму и цвет объектов, находящихся в поле зрения; палочки располагаются в периферическом отделе, обеспечивают скотопическое зрение и обнаруживают слабые световые сигналы на периферии поля зрения.

Максимум спектральной чувствительности для колбочек находится в зоне 556 нм, а для палочек – в зоне 510 нм. Этим различием в спектральной чувствительности колбочек и палочек объясняется феномен Пуркинье, заключающийся в том, что в условиях слабого освещения зеленые и синие цвета кажутся светлее красных и оранжевых, в то время как в условиях дневного освещения эти цвета по светлоте примерно одинаковы.

На восприятие цвета оказывает влияние сила цветового раздражителя и цветовой контраст. Для цветоразличения имеет значение яркость (светлота) окружающего фона. Черный фон усиливает яркость цветных полей, так как они выглядят более светлыми, но в то же время несколько ослабляет цвет. На цветовосприятие объектов существенно влияет также цветность окружающего фона. Фигуры одного и того же цвета на желтом и синем фоне выглядят по-разному. Это явление одновременного цветового контраста.

Последовательный цветовой контраст проявляется в видении дополнительного цвета после воздействия на глаз основного цвета. Например, после рассматривания зеленого абажура лампы белая бумага первое время кажется окрашенной в красноватый цвет. При длительном воздействии цвета на глаз отмечается снижение цветовой чувствительности, вследствие цветового «утомления» сетчатки, вплоть до такого состояния, когда два разных цвета воспринимаются как одинаковые.

### **Демаскирующие признаки объектов в видимом диапазоне электромагнитного спектра**

---

Видовые демаскирующие признаки выявляются с помощью видовых разведок (фотографическая, телевизионная, радиолокационная и т.д.).

Оптические характеристики объектов и окружающей среды играют важную роль как для разведки, так и для эффективной защиты объектов от технических средств разведки. Оптическое изображение объектов и их отдельных элементов по отношению к фону отличаются контрастами по яркости, цвету, размеру, форме. В видимом диапазоне волн видимость объектов определяется яркостным контрастом, при этом в видимом диапазоне дополнительной информацией является цветовой контраст между объектом и фоном. Контраст по яркости между объектом и фоном возникает в результате различной световой отражательной способности объекта и фона.

Контраст по яркости  $K$  определяется как

$$K = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}} = 1 - \frac{B_{\min}}{B_{\max}},$$

где  $B_{\min}$  и  $B_{\max}$  – минимальная и максимальная яркости поверхностей объекта и фона.

При маскировке объекта необходимо принять меры к тому, чтобы яркости объекта и фона были максимально возможно близки друг к другу. В этом случае объект будет малозаметен на фоне окружающей среды. При оценке эффективности маскировки объекта приняты следующие значения коэффициентов контраста по яркости:

$$K \leq 0,2 \text{ (20\%)} - \text{ незаметный контраст;}$$

$K = 0.2 - 0,3$  - малозаметный контраст;

$K = 0.3 - 0,6$  - заметный контраст;

$K \geq 0,5$  - резкозаметный контраст.

Яркость поверхности предметов зависит от освещенности  $E$ , с увеличением которой она пропорционально возрастает. Освещенность в дневное время определяется как

$$E = E_{np} + E_p.$$

где  $E_{np}$ - освещенность прямыми солнечными лучами;  $E_p$  - освещенность рассеянным светом небосвода. Освещенности зависят от погодных условий, ориентации объектов по отношению к солнцу и других условий. Освещенность прямыми солнечными лучами  $E_{np}$  наклонной поверхности зависит от косинуса угла падения лучей.

Кроме освещенности на яркость предметов влияют и их отражающие свойства, о чем уже было сказано в соответствующем разделе лекции.

Чем меньше различие в спектральных характеристиках поверхностей, меньше контраст между ними и тем труднее обнаружить объект.

Видимость объекта зависит также от расстояния. По мере удаления объекта видимость ухудшается. Это обусловлено ослаблением потока при прохождении сквозь атмосферу за счет спектрального поглощения его слоем воздуха, что приводит к уменьшению яркости объекта и фона. Одновременно солнечные лучи, проходя через атмосферу, переотражаются от мельчайших частиц, образуя световоздушную дымку. Таким образом, спектральная (эффективная) яркость поверхности объекта состоит из двух слагаемых: спектральной яркости объекта, наблюдаемого сквозь атмосферу без учета влияния дымки, и яркости вуалирующей световоздушной дымки.

К прямым демаскирующим признакам объектов в видимом диапазоне электромагнитного спектра относятся: форма, размер, тон или цвет, структура, текстура и тень объектов. При этом форма изображения объекта является основным признаком. Размер изображения зависит от масштаба фотоснимка и в меньшей степени является информативным, поскольку требует сравнения с некоторым эталоном. Структура изображения объекта является сложным демаскирующим признаком, содержащим в себе группу прямых признаков разнородных деталей изображения местности. Этот признак мало зависит от условий съемки, поэтому наиболее устойчив. Тени объектов подразделяют на собственные (лежащие на объекте с теневой стороны) и падающие (отбрасываемые объектом на окружающую поверхность). Собственные тени хорошо подчеркивают пространственные формы объекта, а падающие тени способствуют определению не только формы, но и размеров объекта.

Косвенные демаскирующие признаки дополняют некоторые характеристики объектов, не входящие в состав прямых признаков. Так, например, невидимый тоннель можно определить на фотоснимке по разрыву дорожного полотна на определенном участке. К косвенным демаскирующим признакам чаще всего относятся результаты человеческой деятельности на объектах, характерные для определенных типов объектов, а также определенные взаимосвязи совокупности разнородных объектов вплоть до влияния одних объектов на другие.

## Контрольные вопросы по теме

---

### **Уровень модуля**

1. Как возникает оптическое излучение?
2. Какова скорость распространения оптического излучения в вакууме?
3. Каким образом скорость распространения оптического излучения в прозрачной среде связана с показателем преломления этой среды?
4. Каким образом показатель преломления среды связан с относительной магнитной и диэлектрической проницаемостью этой среды?
5. Что такое поверхностная плотность излучения?
6. Что такое облученность (энергетическая освещенность)?
7. Что такое сила излучения?
8. Что такое энергетическая яркость излучающей поверхности?
9. Какие световые единицы применяются при измерении светового потока?
10. В каких случаях вместо энергетических единиц измерения мощности оптического излучения используют световые единицы?
11. Какие световые единицы применяются при измерении силы света?
12. Какие световые единицы применяются при измерении освещенности?
13. Какую величину называют коэффициентом видности?
14. Какую величину называют коэффициентом относительной видности?

### **Уровень курса**

1. Основы оптической радиометрии.
2. Отражение света.
3. Поглощение и рассеяние света.
4. Преломление света.
5. Цветовое зрение.
6. Демаскирующие признаки объектов в видимом диапазоне электромагнитного спектра.

## Лекція № 14

**Тема:** Основные сведения об акустических волнах и их распространении.

**Оглавление**

Акустические колебания и волны .....	2
Типы волн .....	3
Акустические свойства сред .....	4
Отражение и преломление волн .....	6
Факторы, влияющие на качество записи звука.....	7
Контрольные вопросы по теме .....	9
Уровень модуля.....	9
Уровень курса.....	9

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2–07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.



## Акустические колебания и волны

Амплитуда акустических волн в жидкостях и газах характеризуется одним из следующих параметров:

- смещением  $u$  (м) частиц среды из положения равновесия в процессе колебательного движения;
- скоростью (м/с) колебательного движения частиц среды

$$v = \frac{du}{dt}$$

где  $t$  – время.

- акустическим давлением (Па) или изменением давления относительно среднего значения давления в среде:

$$p = \rho c v$$

где  $c$  – скорость распространения акустических волн;  $\rho$  – плотность среды;

Кроме упругости по объему, в твердом теле существует упругость по форме, поэтому в объеме тела могут распространяться волны двух типов: продольные и поперечные. Акустические волны в твердых телах характеризуются либо смещением, либо колебательными скоростями, либо тензорами деформации или напряжения.

Плоская волна, распространяющаяся вдоль оси  $x_y$  описывается формулой

$$a = A \cos(\omega t - kx)$$

Здесь:  $A$  – амплитуда колебаний (амплитуды обозначаем большими буквами);  $\omega = 2\pi f$  – круговая (угловая, циклическая) частота;  $f$  – частота;  $t$  – время;  $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$  – волновое число;  $\lambda = c/f$  – длина волны;  $c$  – скорость распространения волны.

Формула показывает, что величина  $a$  периодически изменяется во времени и пространстве.

В качестве меняющейся величины  $a$  будем использовать смещение  $u$  и акустическое давление  $p$ . Для твердого тела вместо давления правильнее применять напряжение, однако для упрощения формул использовано давление, а особенности твердого тела там, где это необходимо, специально оговорены.

Плотность потока энергии волны

$$W = c\rho|v|^2 = \frac{|p|^2}{c\rho}$$

Средняя плотность потока энергии за период колебаний называется интенсивностью звука.

Для сравнения интенсивностей  $J$  и  $J_0$  или амплитуд  $A$  и  $A_0$  двух акустических волн используют отношение  $N$  (дБ):

$$N = 10\lg \frac{J}{J_0} = 20\lg \frac{A}{A_0}$$

Обычно измеряют ослабление амплитуды  $A$  относительно возбужденных источником колебаний  $A_0$  (начального сигнала), т.е. отношение  $A/A_0$ . Выраженные в децибелах амплитуды будем выделять угловыми скобками  $\langle \rangle$ :

$$\langle A/A_0 \rangle = 20\lg(A/A_0)$$

Поскольку  $A < A_0$ , получаем отрицательные децибелы, однако в дальнейшем отмечать это обстоятельство не будем.

### **Типы волн**

---

Существуют различные типы (моды) волн, отличающиеся направлением колебаний частиц, скоростью распространения и другими признаками.

В объеме твердого тела могут распространяться продольные и поперечные волны. В продольной волне колебательные скорости частиц среды совпадают с направлением распространения волны, в поперечной перпендикулярны к нему.

Вдоль поверхности твердого тела распространяются рэлеевские (поверхностные) и головные (продольные, подповерхностные, ползущие) волны. Амплитуда рэлеевской поверхностной волны имеет максимум на поверхности и уменьшается в 10 раз на глубине около длины поверхностной волны. Рэлеевская волна распространяется на большие расстояния, следуя изгибам поверхности. На выпуклой поверхности скорость ее увеличивается, а на вогнутой уменьшается, но одновременно растет затухание.

В результате волноводного эффекта в пластинах и стержнях возникают нормальные волны: волны в пластинах (волны Лэмба) (рис. 14.1) и стержневые (волны Похгаммера). Колебания охватывают все сечение пластины или стержня. Разные моды этих волн отличаются распределением колебаний по толщине (рис. 14.1). В модах выше нулевой имеются узловые поверхности, где напряжения равны нулю.

Скорости продольных, поперечных и поверхностных волн не зависят от частоты. Скорости волн в пластинах и стержнях зависят от произведения толщины изделия  $h$  на частоту  $f$  деленного на скорость поперечной волны  $c_t$ . Это явление называют дисперсией скорости. Нулевые моды переходят при увеличении толщины в поверхностную волну, остальные в поперечную.

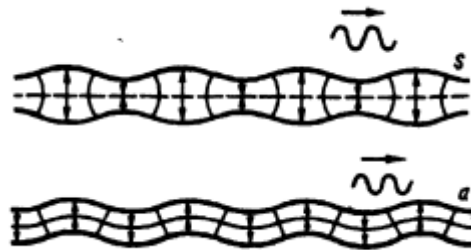


Рис. 14.1 Деформация пластины при распространении симметричных и антисимметричных волн

### Акустические свойства сред

В их число входят упругие свойства, плотность, характеристический импеданс и затухание.

Упругие свойства жидкостей и газов определяются одной константой, например модулем всестороннего сжатия  $K$ . Упругие свойства твердых тел характеризуются двумя независимыми упругими константами, например модулем нормальной упругости  $E$  и модулем сдвига  $G$ .

**Импеданс.** Важным параметром среды распространения упругих колебаний является *характеристический импеданс*, или *удельное волновое сопротивление* (обычно просто *волновое сопротивление*). Он определяется как отношение звукового давления к колебательной скорости в бегущей волне и обычно выражается в виде

$$z = \rho c$$

В отсутствие потерь  $z$  – действительная величина. Комплексный характер  $z$  учитывают только в случае сред с большими потерями, когда  $c$  имеет заметную мнимую составляющую.

*Акустическим импедансом* называется комплексное отношение звукового давления к колебательной скорости  $p/v$  для любой волны. В отличие от  $z$  акустический импеданс зависит не только от параметров среды, но и от условий отражения, границ раздела, углов падения и других факторов.

Размерность характеристического и акустического импедансов Па • с/м.

Изменение скорости  $c$  от температуры  $t$  определяется формулой

$$c = c_0 + K_c (t - t_0)$$

где  $c_0$  – скорость при исходной температуре  $t_0$ . Температурный коэффициент скорости  $K_c$ : для газов – положительный (для воздуха  $+0,6$  м/с • град), для жидкостей – отрицательный (например, для спирта  $-3,6$  м/с • град, однако для воды аномальный  $+2,5$  м/с-град), для твердых тел – отрицательный (для продольных и поперечных волн в металлах  $-0,4 \dots -1$ , для органического стекла  $-3$ ).

Затухание волны с расстоянием определяют коэффициентом затухания  $\delta$  :

$$A = A_0 e^{-\delta r}$$

где  $A$  – амплитуда в точке измерения;  $r$  расстояние, проходимое волной;  $A_0$  – амплитуда волны, прошедшей расстояние  $r$  без учета затухания.

Для характеристики затухания используют также механическую добротность  $Q_m$ , которая связана с коэффициентом затухания:

$$\delta = \frac{\pi}{\lambda Q_m}$$

Коэффициент затухания  $\delta = \frac{1}{r} \ln(A/A_0)$  выражается в неперах/м (Нп/м) и имеет размерность  $m^{-1}$ . Часто его представляют также в децибелах/м (дБ/м). При этом  $1$  Нп/м =  $8,686$  дБ/м,  $1$  дБ/м =  $0,1151$  Нп/м. Общее ослабление сигнала вследствие затухания в среде  $\langle A/A_0 \rangle = \langle \delta \rangle r$ . Эту величину добавляют к ослаблению, вызываемому другими факторами.

Коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения и рассеяния:

$$\delta = \delta_n + \delta_p$$

При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны в результате отражений от неоднородностей среды.

В газах и жидкостях, не засоренных взвешенными частицами, пузырьками воздуха (в жидкости), рассеяние отсутствует и затухание определяется только поглощением. Коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. В связи с этим в качестве характеристики поглощения звука в жидкостях и газах вводят параметр  $\delta/f^2$  .

Для твердых тел коэффициент поглощения чаще всего пропорционален частоте. В этом случае используется параметр  $\delta/f$  , который равен: для стали  $0,1 \dots 1,5$  Нп/МГц • м; для алюминия  $0,05 \dots 0,06$ ; для магния  $0,1$ . Поглощение

определяет затухание акустических волн в аморфных твердых телах, а также в монокристаллах.

### Отражение и преломление волн

Падающая на границу двух протяженных сред плоская волна частично проходит, частично отражается и может трансформироваться. В твердых телах (рис. 14.2) возникают две (продольная и поперечная) отраженные и две преломленные волны с направлениями по закону синусов (закону Снеллиуса)

$$\frac{\sin \beta}{c} = \frac{\sin \gamma_l}{c_l} = \frac{\sin \gamma_t}{c_t} = \frac{\sin \alpha_l}{c_l'} = \frac{\sin \alpha_t}{c_t'}$$

где  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\alpha$  – углы падения, отражения и преломления;  $c$  – скорости волн; индексы  $l$  и  $t$  отмечают продольные и поперечные волны, для нижней среды индексы имеют штрих ( $'$ ), скорость падающей волны без индекса.

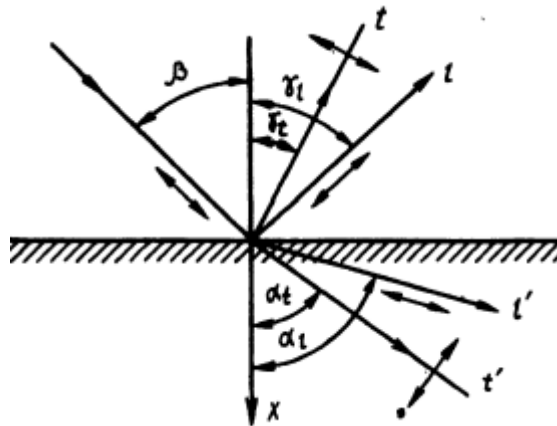


Рис. 14.2. Отражение, преломление и трансформация при падении продольной волны на границу раздела двух твердых сред

Если одна среда (или обе) жидкая или газообразная, то поперечные волны в ней не существуют и количество волн сокращается.

Амплитуды каждой отраженной или прошедшей волны определяются коэффициентами отражения или прозрачности:  $R$  или  $D$ . Эти коэффициенты могут быть по амплитудам смещения, акустического давления или других переменных величин. Часто используют коэффициенты по потокам энергии, перпендикулярным к границе раздела  $\tilde{R}$  и  $\tilde{D}$  (будем называть «по энергии»). Для этих коэффициентов справедливы общие закономерности:

1) сумма всех коэффициентов отражения и прозрачности по энергии равна 1 (закон сохранения энергии):

$$\tilde{R}_l + \tilde{R}_t + \tilde{D}_l + \tilde{D}_t = 1$$

2) коэффициенты отражения по амплитуде однотипной волны с двух сторон от границы равны по модулю и обратны по знаку:

$$R_{ll} = -R_{l'l'}; \quad R_{tt} = -R_{t't'}$$

3) коэффициент прозрачности по энергии равен произведению коэффициентов по амплитуде в двух направлениях, например:

$$\tilde{D}_{tt} = D_{tt'} D_{t'l'} = \tilde{D}_{l'l}$$

То же относится к коэффициентам отражения разнотипных волн:

$$\tilde{R}_{tt} = R_{tt'} R_{l'l} = \tilde{R}_{ll}$$

### **Факторы, влияющие на качество записи звука**

---

Звукозапись в помещении сопровождается большим количеством акустических помех, связанных, во-первых, с наличием многократно отраженных волн от внутренней обстановки помещения, а, во-вторых, с наличием шумов, создаваемых как людьми, так и шумами, и вибрациями, проникающими в помещение извне (с улицы или из соседних помещений).

Акустическое поле в замкнутом объеме можно представить как сумму составляющих поля «прямого» звука, создаваемого звуковыми волнами, не испытавшими ни одного отражения, и составляющих поля, создаваемых отраженными звуковыми волнами. Поле отраженных звуковых волн почти всегда можно считать близким к диффузному, поэтому его часто называют диффузной составляющей.

Для оценки ее влияния на акустические свойства помещения, а, следовательно, и качество записи, вводят понятие акустического отношения для установившегося режима. Оно определяется как отношение суммарного уровня отраженных волн к уровню прямой волны.

В реальных условиях акустическое отношение для удаленных от источника звука точек помещения редко бывает меньше единицы, как правило, оно значительно больше, а иногда даже доходит до величины, равной 10-15. То есть уровень отраженных волн в помещении обычно выше уровня прямого звука. При акустическом отношении больше четырех отраженный звук создает недопустимые помехи для регистрации речевой информации.

Пороговое значение расстояния от источника звука, при котором акустическое отношение равно единице, называют радиусом гулкосты, так как при большем расстоянии диффузная составляющая становится больше составляющей прямого звука, и в записанном сигнале появляется характерная гулкосты.

Однако акустическое отношение полностью не характеризует качество восприятия звука в помещении, так как не все отраженные сигналы вносят помехи, поэтому вводят еще одно понятие - четкость звучания. Под ним понимают отношение плотности энергии прямого звука ( $E_{np}$ ), суммируемой с плотностью отраженных звуковых волн, приходящих в данную точку помещения в течение времени  $T = 60$  мс после прихода прямого звука  $E_{t=60мс}$  (и потому воспринимаемых с ним слитно), к общей плотности энергии  $E_m$ :

$$S_t = \frac{E_{np} + E_{t=60мс}}{E_m}$$

Чем больше четкость звучания, тем меньше влияние помех от запаздывающих лучей из-за явления реверберации. Однако на практике существуют большие трудности по измерению этой величины.

Акустические шумы в помещениях существенно ограничивают динамический диапазон регистрируемой информации, снижают разборчивость речи. Степень их влияния зависит от количества людей в помещении, громкости разговоров, а также уровня шумов, проникающих извне.

В условиях тишины слышны писк комара, жужжание мухи, тиканье часов и другие звуки, а в условиях шума и помех можно не услышать даже громкий разговор. Другими словами, в условиях шума и помех порог слышимости для приема слабого звука возрастает. Это повышение порога слышимости называют акустической маскировкой. Величина маскировки определяется величиной повышения порога слышимости для принимаемого звукового сигнала.

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

1. Какими параметрами характеризуется амплитуда акустических волн в жидкостях и газах?
2. Какими параметрами характеризуется амплитуда акустических волн в твердых телах?
3. Какие два типа акустических волн могут распространяться в твердых телах?
4. Какое выражение используют в акустике при сравнении амплитуд двух акустических волн?
5. В каких единицах измерения определяют отношение амплитуд двух волн в акустике?
6. Как направлено движение частиц при распространении в твердом теле продольной акустической волны?
7. Как направлено колебательное движение частиц при распространении продольной акустической волны в твердом теле?
8. Как направлено колебательное движение частиц при распространении поперечной акустической волны в твердом теле?
9. Как связаны удельное волновое сопротивление, плотность среды и скорость распространения звука в среде?
10. Из каких составляющих складывается коэффициент затухания акустической волны?
11. В каких единицах выражается коэффициент затухания акустической волны?
12. В какой вид энергии переходит звуковая энергия при ее поглощении?
13. В какой вид энергии переходит звуковая энергия при ее рассеянии?
14. Зависит ли коэффициент поглощения акустических волн от частоты?
15. Каким физическим законом описывается преломление акустических волн на границе двух сред?
16. Чему равна сумма всех коэффициентов отражения и прозрачности по энергии при прохождении акустической волны через границу двух сред?

### *Уровень курса*

1. Акустические колебания и волны.
2. Акустические свойства сред.
3. Отражение и преломление акустических волн.
4. Факторы, влияющие на качество записи звука.