

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**  
**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ**  
Кафедра Інформаційної та кібернетичної безпеки

# **ФІЗИЧНІ ПОЛЯ ЯК НОСІЇ ІНФОРМАЦІЇ**

**Навчальний посібник**

галузі знань Інформаційні технології

спеціальність 125 Кібербезпека

спеціалізація Інформаційна та кібернетична безпека

Київ-2019

УДК 004.056; 621.39

Рекомендований до друку Вченою радою Державного університету телекомунікацій, протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_ 2019 року

Гайдур Г.І., Кременецька Я.А., Морозова С.В. Фізичні поля як носії інформації: навчальний посібник. Київ. Державний університет телекомунікацій. 2019. 170 с.

У навчальному посібнику викладено фізичні основи, принципи виникнення технічних каналів витоку інформації, основні методи та засоби їх виявлення та захисту. Розглянуто елементи теорії електромагнітного поля, властивості та параметрів електромагнітних хвиль в різних середовищах та на межах розділу середовищ, теорія випромінювання та оцінка просторових та енергетичних параметрів випромінювачів. Акцентовано увагу на принципи дії фізичних перетворювачів інформації, які використовуються в сучасних системах захисту інформації. Навчальний посібник містить контрольні питання, завдання на самостійну роботу, вказівки до проведення практичних занять.

Навчальний посібник відповідає структурі та змісту програми курсу «Фізичні поля як носії інформації» та призначений для студентів зі спеціальності «Кібербезпека» вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації усіх форм навчання.

Рецензенти:

Вишнівський В.В., д.т.н., проф., Державний університет телекомунікацій

## ЗМІСТ

МЕТА ТА ПРЕДМЕТ ДИСЦИПЛІНИ, ЇЇ РОЛЬ І МІСЦЕ У СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ СУЧАСНОГО ФАХІВЦЯ. ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ І ПОНЯТТЯ	4
1. ФІЗИЧНІ ПОЛЯ ОБ'ЄКТІВ І ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ	6
2. ІНФОРМАЦІЯ ЯК ПРЕДМЕТ ЗАХИСТУ; ДЕМАСКУЮЧІ ОЗНАКИ ОБ'ЄКТІВ ЗАХИСТУ, КАНАЛИ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ	19
3. ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ КАНАЛИ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ	34
4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ ПОЛІВ ЯК ДЖЕРЕЛ І НОСІЇВ ІНФОРМАЦІЇ	43
5. ЕКРАНУВАННЯ ПОЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ПРИРОДИ	70
6. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ	77
7. РІВНЯННЯ МАКСВЕЛА	87
8. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ	96
9. УТВОРЕННЯ І ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ДОСЛІДИ ГЕРЦА. ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ, ДОВЖИНА І ЧАСТОТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ	111
10. ТИПИ АНТЕН. ОСОБЛИВОСТІ ДІАГРАМ СПРЯМОВАНOSTІ АНТЕН В ЗОНІ ФРЕНЕЛЯ	119
11. ВПЛИВ АТМОСФЕРИ НА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ	128
12. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ	136
13. МОДУЛЯЦІЯ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ	141
Питання для самоконтролю	147
Завдання до практичних занять	149
Завдання на самостійну роботу	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	164

## **МЕТА ТА ПРЕДМЕТ ДИСЦИПЛІНИ, ЇЇ РОЛЬ І МІСЦЕ У СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ СУЧАСНОГО ФАХІВЦЯ. ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ І ПОНЯТТЯ**

Навчальна дисципліна «Фізичні поля як носії інформації» надає знання основних теоретичних положень, які стосуються появи та існування інформації, принципам та законам одержання нової інформації, аналізу можливих джерел інформації та каналів її витоку.

Предметом дисципліни є джерела інформації, закони і принципи їх появи, існування у просторі і часі, отримання і зберігання, поля, колювання, хвилі і сигнали як джерела і носії енергії та інформації; основні методи обробки сигналів з метою одержання максимальної кількості інформації.

**Завданнями навчальної дисципліни є формування наступних інструментальних, загально-професійних та спеціалізовано-професійних компетенцій:**

- здатність до системного засвоєння знань;
- наполегливість у досягненні мети;
- відповідальність за якість виконуваної роботи;
- дослідницькі навички;
- базові знання фундаментальних характеристик фізичних хвильових полів і процесів їх поширення у обсязі, необхідному для володіння методами захисту інформації;
- здатність використовувати отримані знання для засвоєння теоретичних основ і практичного використання методів захисту;

Дисципліна «Фізичні поля як носії інформації» викладається в 3 семестрі студентам спеціальності 125 «Кібербезпека» і забезпечується наступними базовими нормативними дисциплінами:

1. Математичний аналіз.
2. Фізика.
3. Сигнали та процеси

Навчальна дисципліна «Фізичні поля як носії інформації» забезпечує вивчення наступних навчальних дисциплін:

1. Теорія інформації та кодування.
2. Комплексні системи інформаційної безпеки.
3. Комплексні системи захисту інформації: проектування, впровадження, супровід.
4. Комплексні системи захисту Інформаційні технології та системи.
5. Теоретичні основи захищених інформаційних технологій.
6. Теорія інформації та кодування.

Програма навчальної дисципліни складається з таких **змістових модулів:**

1. Інформація; поля як її джерела і носії.
2. Хвильові процеси та їх поширення при передачі інформації у захищених ІКС.

### 3. Випромінювання та прийом хвиль.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен:

#### **знати:**

основні визначення, поняття і положення інженерно-технічного захисту інформації;

характеристики, параметри та класифікацію фізичних полів і речовин як проявів і носіїв інформації;

характеристики, параметри, форми опису та класифікація середовищ і хвильових полів, джерела хвиль, енергетичні характеристики полів;

основи теорії поширення хвиль у вільному просторі, однорідному, неоднорідному та анізотропному середовищах та у лініях передачі;

основи теорії поширення земних хвиль;

знання принципів побудови і організації каналів і ліній зв'язку різної фізичної природи;

основні положення теорії передавальних та приймальних антен (систем);

зміст і роль процедур виявлення, розрізнення, розділення та оцінювання параметрів сигналів.

#### **вміти:**

характеризувати основні демаскуючі ознаки інформації, її джерел та носіїв;

характеризувати параметри речовин і фізичних полів як носіїв інформації;

оцінювати глибину проникнення ЕМХ у речовину;

розраховувати дальність прямої видимості у оптичному та радіодіапазонах, а також дальність дії радіосистем;

оцінювати параметри області, суттєвої для поширення хвиль;

оцінювати основні параметри антен;

оцінювати зв'язок між часовими і спектральними характеристиками сигналів;

вміти характеризувати основні принципи побудови технічних систем захисту інформації.

#### Роль і місце дисципліни у підготовці фахівців в області інформаційних систем:

Навчальна дисципліна «Фізичні поля як носії інформації» посідає важливе місце у підготовці спеціалістів з інформаційних систем.

Курс даної навчальної дисципліни базується на знаннях курсів фізики, вищої математики і закладає фундаментальні основи підготовки спеціаліста із захисту інформації.

В силу певних обставин у наш час біля 80% інформації отримується з допомогою технічних засобів різного призначення, які в свою чергу функціонують на різних фізичних принципах. Крім того, отримання інформації ведеться в умовах активного і пасивного її захисту. Таким чином, сучасний спеціаліст повинен бути всебічно підготовленим у багатьох науково-технічних напрямках і перш за все з радіоелектроніки. Головне, він повинен бути обізнаний у тому, де, коли і як можна отримати доступ до джерела відомостей, тобто як можна одержати потрібну інформацію.

## 1. ФІЗИЧНІ ПОЛЯ ОБ'ЄКТІВ І ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Сучасні технічні засоби і системи, призначені для створення, обробки, зберігання та передачі інформації, взаємодіють з іншими інформаційними системами, а також з об'єктами навколишнього середовища. Ця взаємодія відбувається на різних рівнях. Так, наприклад, відома модель відкритої взаємодії інформаційних систем OSI/ISO передбачає 7 рівнів: фізичний, каналний, мережевий, транспортний, сеансовий, представлення даних і додатків. З точки зору технічного захисту інформації найбільшу небезпеку становить фізичний рівень, оскільки на цьому рівні взаємодія здійснюється на основі фізичних закономірностей матеріального світу, тобто на основі фізичних явищ, процесів і ефектів, що об'єктивно існують незалежно від бажання людей. Це призводить до утворення технічних каналів витоку інформації і, як наслідок, до несанкціонованого доступу до інформації, що здійснюється дистанційно за допомогою технічних засобів. Технічні канали витоку інформації можуть породжуватися як безпосередньо самою інформаційною системою, так і за рахунок зовнішніх впливів, здійснених зловмисником за допомогою фізичного середовища.

У наявності проблема інформаційної безпеки, що складається в необхідності технічного захисту інформації від її витоку на фізичному рівні.

При цьому слід зазначити, що технічний аспект захисту інформації включає в себе як захист інформації, що циркулює в технічних системах, так і захист інформації з допомогою технічних засобів. Таким чином, захист інформації від її витоку технічними каналами та захист інформації з допомогою технічних засобів і систем являють собою складні фізико-технічні завдання.

### 1.1 Фізичні ефекти, процеси, явища, що використовуються для формування та передачі інформації

*Фізичне явище* – це сукупність процесів матеріально-інформаційного перетворення речовин, при якому не відбуваються зміни їх складу і утворення нових речовин, а змінюється тільки агрегатний стан речовин, що супроводжується стрибкоподібною зміною вільної енергії, ентропії, густини і інших основних фізичних властивостей.

Фізичні явища сприяють створенню умов для несанкціонованого витоку інформації або забезпечення захисту інформації. У природі відбувається безліч різних фізичних явищ, які сприяють перенесенню інформації, наприклад, провідність металів, електризація, електромагнітна індукція, намагнічування, електромагнітні хвилі, радіовипромінювання та інші.

*Фізичний ефект* - це матеріально-інформаційне перетворення речовини, при якому фізичний вплив на об'єкт призводить до виникнення певного фізичного поля або дії. Як правило це фізичні явища, пов'язані з перетворенням виду енергії або зі зміною фазового стану речовини. Іншими

словами, фізичний ефект (ФЕ) - це закономірність прояву результатів взаємодії об'єктів матеріального світу, що здійснюється за допомогою фізичних полів. При цьому закономірність прояву характеризується послідовністю і повторюваністю при ідентичності умов взаємодії.

*Фізичний процес* - це послідовна зміна станів матеріального об'єкта. Таким чином, фізичний ефект проявляється в сукупності фізичних процесів. З визначення випливає, що фізичні ефекти призводять до утворення технічних каналів витоку інформації, оскільки саме фізичні поля є носіями інформації. Фізичні ефекти також лежать в основі побудови технічних засобів захисту інформації. В даний час науці відомо близько 300 різних фізичних ефектів. У рамках даного навчального курсу будуть розглядатися тільки ті фізичні явища і ефекти, які впливають на захист інформації. До них відносяться явища електромагнітної індукції, поширення електромагнітних хвиль, пружних механічних хвиль, акустоелектричний, п'єзоелектричний, трибоелектричний, магнітострикційний ефекти та інші.

Різноманітність фізичних процесів і явищ, які відбуваються в природі за сучасними уявленнями зумовлене чотирма типами взаємодій: всесвітнім тяжінням, електромагнітними, ядерними і слабкими взаємодіями. Кожному типу взаємодії відповідають певні фізичні поля.

## **1.2 Закономірності прояву фізичних ефектів на одному фізичному об'єкті**

1. На одному фізичному об'єкті від різних впливів можуть проявлятися різні фізичні ефекти.

2. На одному фізичному об'єкті одночасно можуть виявлятися декілька ФЕ.

За характером прояву фізичні ефекти утворюють такі групи:

1) ФЕ - *провідники*, до них відносяться ефекти, пов'язані з провідністю певного виду енергії, наприклад: електропровідність, світлопровідність, звукопровідність і т. ін.;

2) ФЕ - *модифікатори*, тобто ефекти, пов'язані з модифікацією результату впливу по відношенню до впливу без перетворення одного виду енергії в інший, наприклад: ефект заломлення звукових хвиль, ефект фокусування і дефокусування світла, поляризації та ін. При цьому результат впливу і вплив є різновидами одного фізичного поля і відрізняються лише характеристиками;

3) ФЕ - *перетворювачі енергії*, тобто ефекти, пов'язані з перетворенням одного виду енергії в інший, наприклад акустоелектричний, п'єзоелектричний і фотовольтаїчний ефекти. Ці ФЕ мають різні впливи, але однакові результати впливу, в наведених прикладах - електричне поле. При цьому перетворення як такого одного фізичного поля в інше не відбувається. Відбувається лише передача енергії одного фізичного поля через відповідні структурні елементи іншим структурним елементам-носіям іншого фізичного поля. Відбуваються зміни у взаємозв'язках між структурними елементами.

4) ФЕ - *перетворювачі фізичних об'єктів*, тобто ефекти, пов'язані з перетворенням фізичного об'єкта, що виявляється в наступному:

- в зміні фізичних властивостей, наприклад: прозорості, електропровідності, намагніченості і т. ін .;
- в зміні структури, наприклад: перехід від однієї кристалічної структури до іншої і т. ін .;
- в зміні агрегатного стану: плавленні, конденсації, сублімації, випаровуванні і т. ін .;
- в зміні складу структурних елементів: розподілі і синтезі молекул, атомів, ядер атомів і ін.

Зміна властивостей фізичного об'єкта в свою чергу впливає на прояв інших ФЕ на цьому ж фізичному об'єкті.

Функціонування будь-якої технічної системи засноване на прояві тих чи інших ФЕ. Здебільшого технічні системи являють собою важкі ієрархічні системи, які характеризуються безліччю структурних елементів і зв'язків між ними. Функціонування таких технічних систем ґрунтується на прояві безлічі взаємопов'язаних ФЕ. Сукупність взаємопов'язаних ФЕ утворює фізичну основу технічної системи.

Проведений аналіз показав, що для забезпечення захисту інформації, яка циркулює в технічній системі, необхідно здійснити захист технічної системи і її елементів від небажаних ефектів шляхом:

- зменшення кількості і значення параметрів побічних(несанкціонованих) результатів впливу;
- зменшення впливу навколишнього середовища на технічну реалізацію фізичних ефектів і умов їх прояву.

### **1.3. Сутність процесу передачі інформації**

Нематеріальна інформація має здатність (властивість) поширюватися в просторі, якщо вона міститься на матеріальному носії. В якості носіїв інформації виступають люди, матеріальні тіла (макротіла), фізичні поля і елементарні частинки (мікрочастинки). Інформація, втілена і зафіксована в деякій матеріальній формі, називається повідомленням.

Санкціонована передача інформації здійснюється за функціональними каналами телекомунікаційних систем. Несанкціонований виток інформації відбувається технічними каналами витоку інформації. Розглянемо сутність процесу передачі інформації і його основні поняття.

Передача інформації - це фізичний процес, за допомогою якого здійснюється переміщення інформації в просторі. Даний процес характеризується наявністю наступних компонентів: джерело інформації; приймач інформації; носій інформації; фізичне середовище передачі.

Інформація передається у вигляді повідомлень від деякого джерела інформації до її приймача за допомогою каналу зв'язку між ними. При цьому



передане повідомлення повинно бути перетворено в передавальний сигнал. Сигнал - це фізичний об'єкт, фізичні величини якого змінюються відповідно до повідомлення, яке передається. Для передачі інформації використовуються як безперервні, так і дискретні сигнали.

*Канал зв'язку* - це матеріальне (фізичне і технічне) середовище, в якому здійснюється фізичний процес, за допомогою якого реалізується передача сигналів. До процесів, що використовуються для передачі повідомлень (сигналів) відносяться: механічне переміщення макроносія, переміщення електричних зарядів, поширення електромагнітних хвиль, світлових хвиль, звукових хвиль.

*Лінія зв'язку* - це сукупність технічних пристроїв, що забезпечують передачу сигналу від джерела до одержувача. Вона містить пристрій, який кодує і декодує.

*Кодуючий пристрій* - пристрій, призначений для перетворення вихідного повідомлення джерела у вигляд, зручний для передачі.

*Декодер* - пристрій для перетворення кодованого повідомлення у вихідне, яке сприймається приймачем.

На будь-який реальний канал зв'язку діють зовнішні фізичні впливи, а також у ньому можуть відбуватися внутрішні фізичні процеси, в результаті яких відбувається спотворення як сигналів, які передаються, так і пов'язана з ними інформація. Такі дії називаються шумами (перешкодами/завадами).

*Шум* - безладні коливання різної фізичної природи, що відрізняються складністю тимчасової і спектральної структури.

*Електромагнітний шум (завада)* - небажане фізичне явище або вплив фізичних полів і їх модифікацій від зовнішнього або внутрішнього джерела, яке порушує нормальну роботу технічних засобів або викликає погіршення технічних характеристик і параметрів цих засобів.

Повідомлення від джерела інформації, подане у формі тексту, телеграми, звуків, зображень або цифрового потоку даних, перетворюється за допомогою кодуючого пристрою в первинний електричний сигнал низької частоти. Такі сигнали не можуть ефективно випромінюватись у вільний простір, а також поширюватись на великі відстані без додаткового підсилення. Для усунення даного недоліку канал передачі містить передавач і приймач.

З наведеного матеріалу випливає, що енергетичний процес передачі інформації в свою чергу складається із сукупності функціональних процесів: генерації несучого коливання, модуляції, посилення, електромагнітного випромінювання, поширення електромагнітних хвиль або електричного струму (зарядів), селекції (фільтрації), демодуляції (детектування).

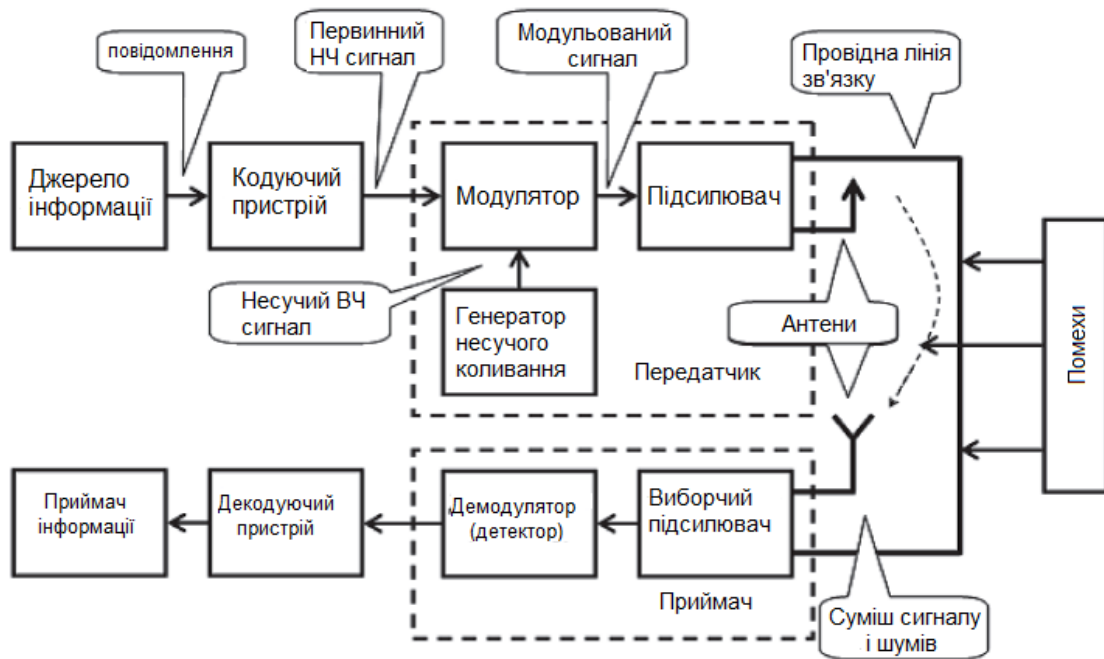


Рис. 1. Структура лінії зв'язку

#### 1.4. Характеристика фізичних полів об'єктів

##### ПОНЯТТЯ ФІЗИЧНОГО ПОЛЯ

Під *полем* у фізиці розуміють фізичний об'єкт, який класично описується деякою динамічною фізичною величиною, названою *польовою змінною*, визначеною у всіх точках простору, яка в різних точках простору може приймати різні значення і до того ж змінюватися з часом. Як польовою змінною фізичних полів найчастіше виступають такі фізичні величини, як потенціал (скалярний, векторний, тензорний) і напруженість.

Найбільш просто уявити поле, що має механічну природу, у вигляді збурення (відхилення від рівноваги, руху) певного (гіпотетичного або просто уявного) суцільного середовища, що заповнює весь простір. Наприклад, акустичне (звукове) поле можна представити і математично описати у вигляді коливань частинок пружного (твердої, рідкої або газоподібної) середовища.

##### ФІЗИЧНІ ПОЛЯ РІЗНОЇ ПРИРОДИ ЯК НОСІЇ ІНФОРМАЦІЇ

З теорії інформації відомо, що носій інформації (інформаційний носій) – це будь-який матеріальний об'єкт або середовище, що містить інформацію, здатний досить тривалий час зберігати цю інформацію в своїй структурі.

Носії інформації дозволяють проводити запис інформації, її зберігання та передачу в просторі і часі. Існує 4 види носіїв інформації: люди; матеріальні тіла (макротіла); фізичні поля; елементарні частинки (мікрочастинки). В рамках даного навчального посібника в якості носіїв інформації

розглядаються тільки фізичні поля, які в сучасному техногенному світі є основними носіями інформації.

Загальною властивістю фізичних полів є їх хвильовий характер, тому їх можна ще назвати носіями хвильового (енергетичного) типу. Інформація міститься в значеннях параметрів полів. Якщо поля являють собою хвилі, то інформація може міститися в амплітуді, частоті і фазі.

Запис інформації на носії у вигляді фізичних полів здійснюється шляхом зміни параметрів сигналу-носія. Сигнали-носії можуть бути двох видів: аналогові і дискретні. Аналоговий сигнал змінюється в часі безперервно, і приймає значення з континууму значень, тобто з безперервної сукупності. Як правило, це гармонійні (синусоїдальні) сигнали. Дискретний сигнал змінюється в певні моменти часу і приймає одне з безлічі значень, наприклад двійковий відеосигнал.

Безперервна зміна параметрів аналогового сигналу відповідно до значень первинного сигналу називається модуляцією, дискретного - маніпуляцією. Первинним є сигнал від джерела інформації. Якщо змінюються значення амплітуди аналогового сигналу, то має місце амплітудна модуляція (АМ), якщо частоти - частотна (ЧМ), фази - фазова (ФМ). При цьому модульоване коливання називається несучим.

При маніпуляції дискретних сигналів в якості модульованих параметрів, крім амплітуди, застосовуються: тривалість імпульсу, частота його повторення і ін.

Сигнали в залежності від природи поля можуть бути:

- оптичними, або світловими, наприклад, зміна інтенсивності світла (спалахи світла);
- електричними, наприклад, зміна сили струму, напруги;
- магнітними, наприклад, зміна магнітної індукції, напруженості магнітного поля;
- електромагнітними, наприклад, радіохвилі;
- звуковими (акустичні коливання).

Розглянемо фізичні поля, які найбільш часто застосовуються в якості носіїв інформації. До цих полів насамперед належать фізичні поля електромагнітної природи:

- електричне поле;
- магнітне поле;
- електромагнітне поле.

Крім цих полів, як носій інформації виступає акустичне (звукове) поле.

**Електричне поле.** Джерелами електричних полів є електричні заряди, якими насичені всі сучасні радіоелектронні прилади. Кожне заряджене тіло створює в навколишньому просторі електричне поле. Це поле чинить силову дію на інші заряджені тіла, що використовується в багатьох технічних засобах, наприклад в приладах нічного бачення.

У змінному електричному полі інформація міститься в параметрі, який називається напруженістю електричного поля.

Дія електричного поля на провідник призводить до утворення електричного струму, тобто до напрямленого руху заряджених частинок. За напрямними лініями електричний струм поширюється на великі відстані і таким чином переносить інформацію, яка може міститися в зміні його амплітуди, або частоти, або фази.

Дія електричного поля на нейтральні провідники, поміщені в діелектрику, призводить до його поляризації і утворення вторинного електричного поля, в результаті якого на основі явища електричної індукції провідники накопичують заряди. Так виникають паразитні ємнісні зв'язки, що призводять до утворення джерел небезпечних несанкціонованих випромінювань або сигналів.

**Магнітне поле.** Джерелом поля є рухомі електрично заряджені частинки - носії струму, що створюють елементарні магнітні поля, які складаються в загальне магнітне поле.

У змінному магнітному полі інформація міститься в параметрах, які називаються магнітна індукція і напруженість магнітного поля.

Магнітне поле є силовим полем, але його найважливішою особливістю, на відміну від електричного поля, є те, що воно діє тільки на ті електричні заряди, що рухаються в цьому полі.

Дія змінного магнітного поля на провідники призводить до виникнення явища електромагнітної індукції, тобто до виникнення ЕРС (електрорушійної сили) в замкненому провідному контурі і значить до виникнення в ньому індукційного (наведеного) струму, який може несанкціоновано витікати за межі контрольованої зони.

Крім того, магнітне поле призводить до виникнення в провідниках явища самоіндукції, що призводить до утворення індуктивних паразитних зв'язків, і як наслідок - виникнення небезпечних несанкціонованих випромінювань або сигналів.

Безпосередньо змінне електричне або змінне магнітне поле виявляється і діє в ближній зоні, тобто на невеликій відстані, приблизно рівній довжині хвилі поля. Такі поля називаються індукційними, оскільки вони не втрачають зв'язків із його зарядами або струмами, що їх породили. На відстані декількох довжин хвиль сили індукції практично зникають, і головним стає поле біжучої хвилі біжить - поле випромінювання, тобто електромагнітне поле.

**Електромагнітне поле** - особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між електрично зарядженими частинками. Носієм поля є фотон - елементарна частинка-носій електромагнітної взаємодії, квант електромагнітного випромінювання (у вузькому сенсі - світла). Це безмасова частинка, здатна існувати тільки в русі зі швидкістю світла. Фотону властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм. З одного боку, фотон виявляє властивості електромагнітної хвилі в явищах дифракції (огинання перешкод хвилями) і інтерференції (перерозподілу інтенсивності в результаті накладання або суперпозиції декількох хвиль). З іншого боку, фотони в процесах випромінювання і поглинання поведуться виявляють властивості частинок.

Електромагнітна взаємодія фотонів забезпечує існування електромагнітного поля незалежно від джерела. При цьому змінне у часі електричне поле збуджує магнітне поле, а змінне магнітне поле - вихрове електричне поле, і так далі. Безперервно змінюючись, обидва компоненти підтримують існування електромагнітного поля.

Важливими особливостями електромагнітного поля є:

- рівномірне поширення у всіх напрямках від точки виникнення;
- існування в просторі навіть після того, як джерело електромагнітного поля перестало діяти;
- можливість поширення в різних середовищах, в тому числі в вакуумі.

Електромагнітне поле має стандартні характеристики, властиві всім полям:

- процес поширення в просторі являє собою хвильовий процес (в даному випадку це електромагнітні хвилі);
- здійснює перенесення енергії, тобто може бути носієм інформації, яка може міститися в амплітуді, частоті і фазі електромагнітної хвилі.

Електромагнітні хвилі є поперечними: коливання векторів напруженості  $E$  змінного електричного поля і напруженості магнітного поля  $H$  перпендикулярні вектору швидкості поширення (див. рис. 2).

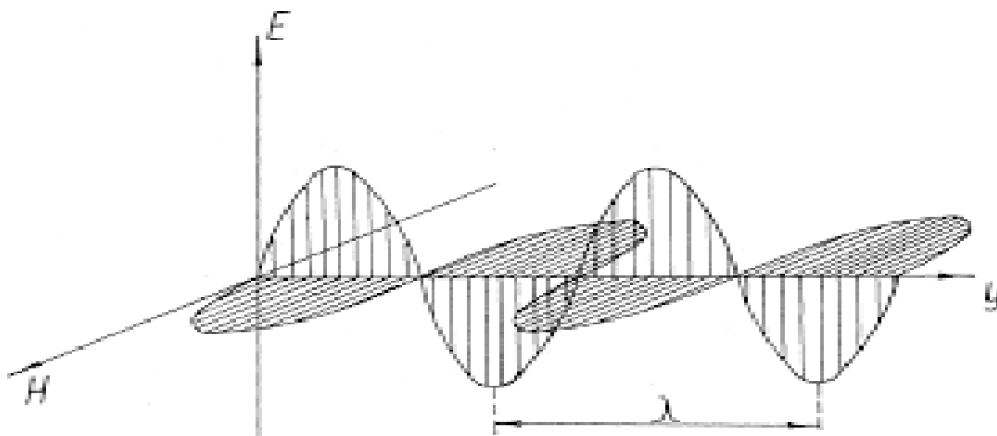


Рис. 2. Структура електромагнітних хвиль

**Акустичне поле** має механічну природу. Воно являє собою область пружного середовища, яка є засобом передачі акустичних хвиль, що поширюються в газоподібному, рідкому і твердому середовищах.

Акустичне поле є силовим нулем, що поширюється за допомогою пружних (силових) хвиль в звуковому, ультразвуковому або інфразвуковому діапазоні. Акустичне поле характеризується звуковим тиском і акустичним опором.

Енергетичними характеристиками акустичного поля, що впливають на перенесення інформації, є інтенсивність акустичних коливань і потужність звуку.

Джерелами акустичного сигналу можуть бути люди, які звучать, механічні, електричні або електронні пристрої, прилади і засоби, які відтворюють раніше записані звуки.

Технічні засоби розвідки, крім перерахованих полів, ефективно працюють з **сейсмічними полями**. Тому і в таких полях виникає проблема захисту інформації. Для сейсмічної розвідки інформативні хвилі, що поширюються в земній корі. Приймаючи сигнали, що переносяться цими хвилями, можна виявити, ідентифікувати і пеленгувати джерело сейсмічних коливань. Якщо на тіло діють зовнішні сили, то всередині нього встановлюється врівноважена система внутрішніх сил.

### 1.5. Фізичні основи утворення каналів витоку інформації

Будь-який носій інформації у вигляді фізичного поля завжди взаємодіє з об'єктами фізичного та технічного середовища.

Особливість фізичного середовища полягає в тому, що воно може знаходитися в різних агрегатних станах, характеризуватися різними параметрами (тиск, радіація, електромагнітне випромінювання та ін.). Фізичне середовище впливає на можливості передачі інформації, на її збереження та цілісність.

У свою чергу, носій інформації може впливати на фізичне середовище, наприклад, шляхом нормування значень її параметрів (рівень освітлення, наявність перешкод у вигляді електромагнітних випромінювань і т. ін.), утворювати демаскуючі ознаки та ін.

Під *витоком інформації* маємо на увазі несанкціонований процес перенесення інформації від джерела до несанкціонованого користувача. Фізичний шлях перенесення інформації від її джерела до несанкціонованого користувача називається *каналом витоку*. Технічні засоби, які забезпечують витік інформації, утворюють технічні канали витоку інформації.

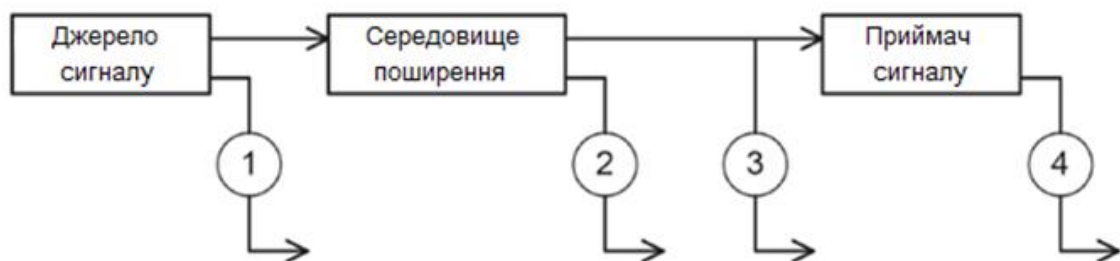


Рис.3 Структурна схема технічного каналу витоку інформації:

1 – побічні випромінювання джерела сигналу, промодульовані інформаційним сигналом; 2- побічні випромінювання при проходженні сигналу через середовище його передачі; 3 – розсіювання переданого сигналу; 4 – побічні випромінювання при роботі приймача сигналу, промодульовані інформаційним сигналом

Впливи можуть бути надані з різними цілями: перехоплення інформації шляхом ВЧ-нав'язування, завада поширенню інформаційного сигналу шляхом зашумлення, руйнування інформації, спотворення інформації та ін.

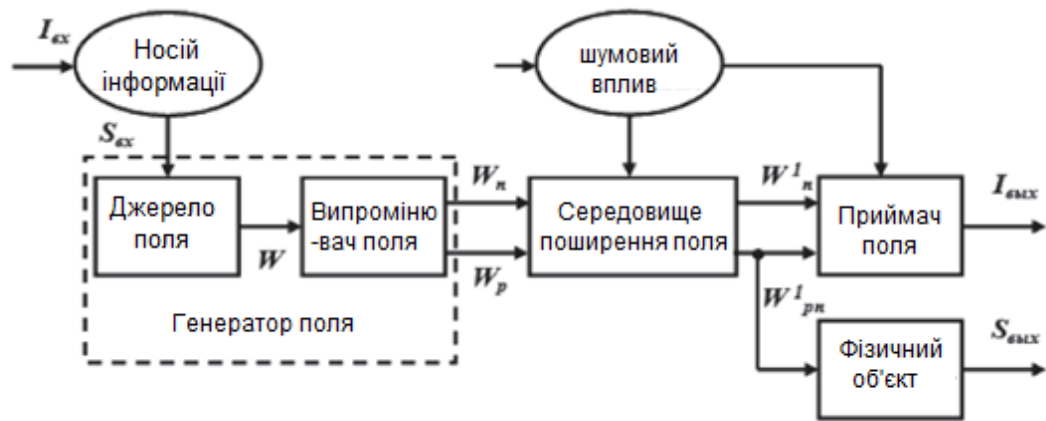


*Рис.4* Схема системи передачі інформаційного сигналу з впливами зі сторони навколишнього середовища:

*1 – вплив на джерело сигналу; 2- вплив на середовище поширення сигналу; 3- вплив на приймач*

Із структурної моделі видно, що використання іншого поля в якості шумового впливу, виробленого в середовищі поширення, призводить до наведення в приймачі (фізичному об'єкті) шумового сигналу, який спотворює інформаційний сигнал, запобігаючи витоку інформації. Як спосіб захисту можна використовувати ФЕ - перетворювачі об'єктів, що здійснюють зміну фізичних властивостей середовища. Наприклад, за рахунок екранування і заземлення випромінювача поля змінюється середовище поширення, і як наслідок, за рахунок іншого ФЕ - провідності небезпечне поле перенаправляється і йде в землю.

У результаті декомпозиції канал витоку інформації можна уявити у вигляді структурної моделі, яка представлена на рис. 5



*Рис.5 Структурна модель технічного каналу витоку інформації:  
 – вхідна інформація від джерела інформації, – вхідний сигнал,  $W$  – енергія джерела поля,  
 $W_n$  – корисна енергія випромінювання фізичного поля,  $W_p$  – енергія розсіювання (побічного  
 випромінювання) фізичного поля,  $W^1_n$  – енергія фізичного поля після проходження  
 середовища поширення,  $W^1_{pn}$  – енергія побічного фізичного поля після проходження  
 середовища поширення,  
 $S_{вых}$  – індукційний (наведений) сигнал у фізичному об'єкті,  $I_{вых}$  – інформація з виходу  
 приймача поля*



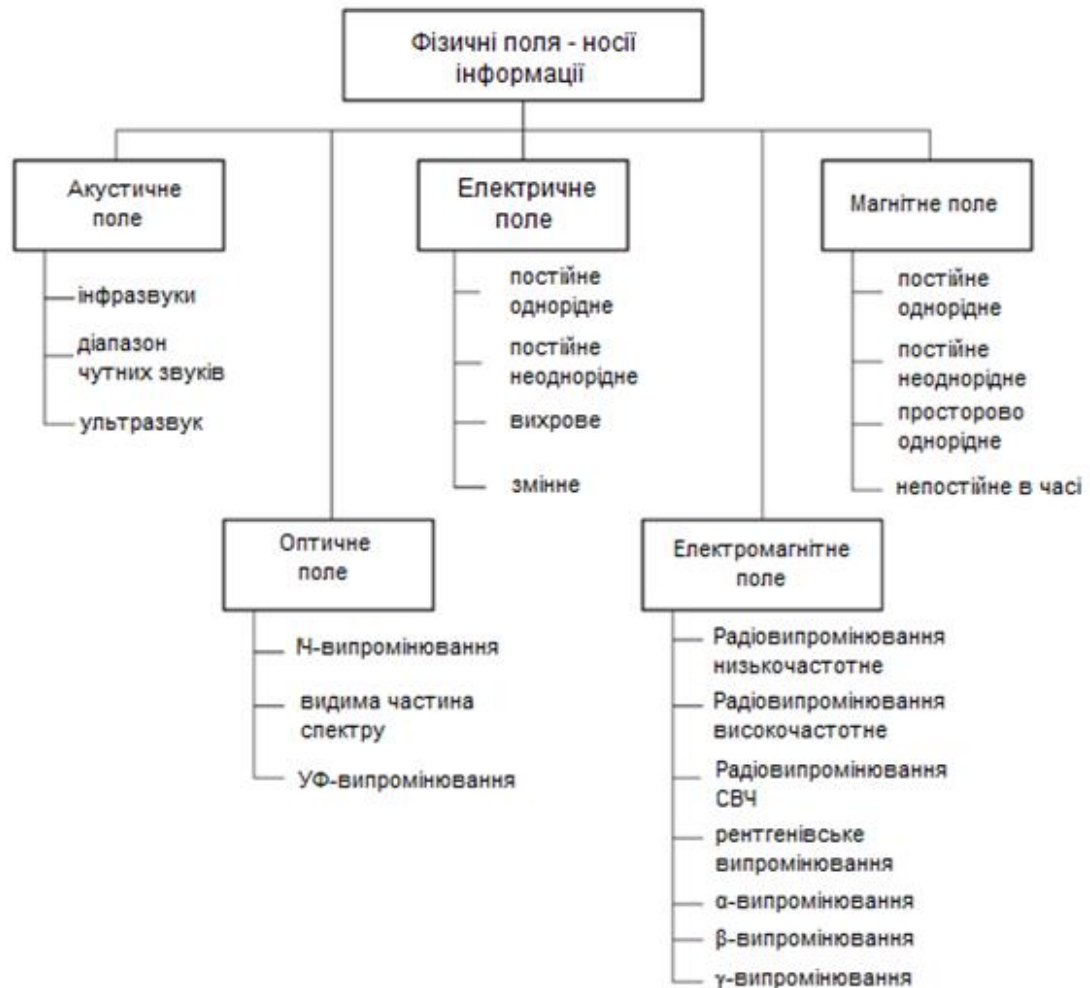


Рис.6 Схема різновидів фізичних полів – носіїв інформації

Таблиця 1

**Взаємозв'язок між носіями інформаційного сигналу і фізичними середовищами**

Носії інформації \ Фізичне середовище	Газоподібне	Рідке	Тверде
	<b>Польові:</b>		
1. Акустичне поле	+	+	+
2. Електричне поле		+	+
3. Магнітне поле		+	+
4. Оптичне поле	+	+	+

**Контрольні питання**

1. Які групи утворюють фізичні ефекти за характером прояву.
2. Якими компонентами характеризується процес передачі інформації?
3. Дайте означення каналу зв'язку, лінії зв'язку, шуму
4. Зобразіть структурну схему каналу передачі інформації і поясніть його роботу.
5. Якими основними фундаментальними взаємодіями характеризуються фізичні поля?
6. Яким чином фізичні поля використовують в якості носіїв інформації?
7. У чому відмінність між модуляцією і маніпуляцією?
8. Які бувають сигнали в залежності від природи поля?
9. Охарактеризуйте електричне поле.
10. Охарактеризуйте магнітне поле.
11. Що виступає в якості носія електромагнітного поля?
12. Які властивості має акустичне поле?
13. Яким чином фізичне середовище впливає на можливості передачі інформації?
14. Що розуміємо під витокком інформації?
15. Поясніть структуру каналу витоку інформації.
16. Які умови можуть впливати на інформаційний сигнал?
17. Поясніть структурну модель технічного каналу витоку інформації.
18. Дайте класифікацію технічних каналів витоку інформації.

## 2. ІНФОРМАЦІЯ ЯК ПРЕДМЕТ ЗАХИСТУ; ДЕМАСКУЮЧІ ОЗНАКИ ОБ'ЄКТІВ ЗАХИСТУ, КАНАЛИ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ

Одержанням інформації займаються усі: ошадливі домогосподарки (про ціни), цікаві сусідки, ревниве подружжя і т.ін., але професійно цим займаються наука та розвідка.

Взагалі інформація – це знання, відомості про що-небудь, що є цікавим і корисним для певної діяльності, а саме: *(визначення інформації)*. З точки зору теорії інформації інформацією є тільки ті відомості, які зменшують невизначеність, що існувала до їх отримання.

Інформація може бути класифікованою:

- 1) за змістом: воєнно-політична, воєнно-економічна, воєнно-технічна, військова, екологічна і т.д.;
- 2) за видом: стратегічна, оперативна, тактична;
- 3) за ступенем обробки: первинна, фактична, узагальнена, підсумкова;
- 4) за важливістю: особливо цінна, цінна, важлива, така, що становить інтерес (цікава), така, що не становить інтересу (нецікава);
- 5) за достовірністю: достовірна, імовірна, сумнівна, неправдива (дезінформація);
- 6) за повнотою: повна (достатня), неповна (недостатня), надлишкова;
- 7) за своєчасністю: вчасна, запізнiла;
- 8) за доступністю: відкрита, конфіденційна, закрита.

### Основні властивості інформації як предмета захисту

З точки зору захисту інформація має низку властивостей, основними з яких наступні:

1. Інформація доступна людині, якщо вона міститься на матеріальному носії. Оскільки за допомогою матеріальних засобів можна захищати тільки матеріальний об'єкт, то об'єктами інформаційного захисту є матеріальні носії інформації. Розрізняють носії - джерела інформації, носії - переносники інформації та носії - одержувачі інформації. Наприклад, креслення є джерелом інформації, а папір, на якій він намальований, - носій інформації. Фізична природа джерела і носія в цьому прикладі одна і та ж - папір. Однак між ними існує різниця. Папір без нанесеного на неї тексту або малюнка може бути джерелом інформації про її фізичні і хімічні характеристики. Коли папір містить семантичну інформацію, їй присвоюється інше ім'я: креслення, документ і т. ін. Креслення деталі або вузла входить до складу більш складного документа - креслення приладу, механізму або машини і далі, закінчуючись конструкторською документацією зразка продукції. Отже в залежності від призначення джерелам можуть присвоюватися різні імена. Але, незалежно від найменування документа, захищати від розкрадання, зміни та знищення інформації треба аркуші паперу, які мають певні розміри, вагу, механічну міцність, стійкість до зовнішніх впливів фарби або чорнила. Параметри носія визначають умови і способи зберігання інформації. Інші носії, такі як поля, не

мають чітких меж в просторі, але в будь-якому випадку їх характеристики можна виміряти. Фізична природа носія-джерела інформації, носія-переносника і носія-одержувача може бути як однаковою, так і різною.

Передача інформації шляхом переміщення її носіїв в просторі пов'язана з витратами енергії, причому величина витрат залежить від довжини шляху переміщення і виду носія. В принципі інформація може бути передана на будь-яку відстань як завгодно малою енергією. Ця обставина не враховується при обґрунтуванні тверджень про неможливість безпосередньої передачі інформації між людьми на великі відстані через енергетичні обмеження.

2. Цінність інформації оцінюється ступенем корисності її для власника (одержувача). Вона може забезпечувати її власнику певні переваги, приносити прибуток, зменшувати ризик його діяльності в результаті прийняття більш обґрунтованих рішень.

Нейтральна інформація не впливає на стан справ її одержувача, але носій з нейтральною для конкретного одержувача інформацією може мати шкідливий вплив на інший носій з корисною інформацією, якщо параметри носіїв близькі за значеннями (наприклад, частоти коливань електромагнітних полів від різних джерел). Носії інформації, що впливають на інші носії, являють собою завади. Те, що для одного одержувача є інформацією, для іншого - завада. Коли під час розмови по телефону через несправність в ланцюгах комутації телефонної станції чути розмову інших людей, то кожна пара абонентів сприймає іншу розмову як заваду.

Шкідливою є інформація, в результаті використання якої її одержувачу наноситься моральна чи матеріальна шкода. Коли така інформація створюється навмисно, то її називають дезінформацією. Часто шкідлива інформація створюється в результаті цілеспрямованої або випадкової модифікації її при перенесенні з одного носія на інший. Якщо в якості таких носіїв виступають люди, то шкідлива інформація циркулює у вигляді чуток. Широко практикується спосіб дезінформації людей шляхом використання механізму поширення чуток.

Корисність інформації завжди конкретна. Немає цінної інформації взагалі. Інформація корисна чи шкідлива для конкретного її одержувача - користувача. Під користувачами мається на увазі як одна людина або автомат, так і група людей і навіть все людство. Тому при захисті інформації перш за все визначають коло осіб (фірм, держав), зацікавлених в інформації, що захищається, оскільки ймовірно, що серед них виявляться зловмисники.

3. З огляду на те що інформація може бути для одержувача корисною чи шкідливою, тобто приносити йому прибуток або збиток, що вона купується і продається, інформацію можна розглядати як товар. Ціна інформації пов'язана з її цінністю, але це різні поняття. Наприклад, при проведенні досліджень можуть бути витрачені великі матеріальні і фінансові ресурси, які завершилися негативним результатом, тобто не отримується інформація, на основі якої її власник може отримати прибуток. Але негативні результати є

цінними для фахівців, що займаються даної проблемою, оскільки отримана інформація вкорочує шлях до істини.

Корисна інформація може бути створена її власником в результаті його науково-дослідницької діяльності, запозичена з різних легальних джерел, може потрапити до зловмисника випадково, наприклад, в результаті ненавмисного підслуховування і, нарешті, здобуто різними нелегальними шляхами. Ціна інформації, як і будь-якого товару, складається з собівартості і прибутку.

Собівартість визначається витратами власника інформації на її отримання шляхом:

- проведення досліджень в наукових лабораторіях або аналітичних центрах, групах і т. ін .;
- придбання інформації на ринку інформації;
- добування інформації протиправними діями.

Прибуток від інформації на увазі її особливостей може приймати різні форми, причому її грошове вираження не є найпоширенішою формою. У загальному випадку прибуток від інформації можна отримати в результаті наступних дій:

- продажу інформації на ринку;
- матеріалізації інформації в продукції з новими властивостями або технологіях, які приносять прибуток;
- використання інформації для прийняття більш ефективних рішень.

Остання форма прибутку від інформації не настільки очевидна, але вона найпоширеніша. Це зумовлено тим, що будь-яка діяльність людини є за своєю суттю послідовністю прийняття ним рішень. Більшість рішень приймається людиною несвідомо, усвідомлено людина в основному приймає життєво важливі рішення.

Для прийняття будь-якого рішення потрібна інформація, причому чим вище ризик і ціна рішення, тим більшого обсягу і більш якісною повинна бути інформація. Роздуми перед прийняттям рішення - не що інше, як переробка людиною наявної у неї інформації. З власного досвіду кожен знає, як важко прийняти відповідальне рішення в умовах дефіциту інформації або часу.

Брак часу на обробку інформації за наслідками ідентичний до нестачі інформації у вигляді і формі, які необхідні для прийняття конкретного рішення. Тому численні помічники державних діячів готують їм інформацію в стислому вигляді, що дозволяє цим особам прийняти обґрунтовані рішення за короткий час.

З огляду на життєву потребу в інформації для будь-яких живих організмів природа створила механізм, що змушує їх шукати інформацію у випадку її дефіциту. Таким загальним механізмом для активізації діяльності живих істот по задоволенню основних потреб, в тому числі інформаційної потреби, є емоції. Рівень негативних емоцій живої істоти пропорційний дефіциту інформації, необхідної для прийняття ним рішень. Алгоритм поведінки живої

людини формується таким, щоб усунути причини негативних емоцій, в тому числі шляхом пошуку інформації.

4. Цінність інформації змінюється в часі. Поширення інформації та її використання призводять до зміни її цінності і ціни. Залежно від виду інформації, її цінність може змінюватися в значних межах. Як правило, цінність інформації з часом знижується, але бувають винятки. Наприклад, на початку століття результати досліджень по атомній фізиці носили чисто пізнавальний характер і цікавили вузьке коло вчених. Інформація в цій області набула надзвичайно високої цінності, коли з'явилися реальні можливості практичного використання ядерної енергії.

Зменшення цінності інформації в часі називають її старінням. Старіння інформації  $C_i$  в часі в першому наближенні можна апроксимувати виразом вигляду:

$$C_i(\tau) \approx C_0 \exp(-2.3\tau / \tau_{жц}),$$

де  $C_0$  - корисність інформації в момент її виникнення (створення);

$\tau$  - час від моменту виникнення інформації до моменту її використання;

$\tau_{жц}$  - тривалість життєвого циклу інформації (від моменту виникнення до моменту старіння).

Відповідно до цього виразу, за час життєвого циклу цінність інформації зменшується до 0.1 початкової величини.

Залежно від тривалості життєвого циклу комерційна інформація в [3] класифікується наступні чином:

- оперативно-тактична, втрачає цінність приблизно по 10% в день (наприклад, інформація видачі короткострокового кредиту, пропозиції щодо придбання товару в термін до одного місяця і ін.);

- стратегічна інформація, цінність якої зменшується приблизно на 10% в місяць (відомості про партнерів, про довгостроковий кредит, розвиток і т. ін.).

Інформація про закони природи має дуже великий час життєвого циклу. Її старіння проявляється в уточненні законів, наприклад, в обмеженнях законів Ньютона для мікросвіту.

5. З огляду на конкретність корисності інформації, не можна об'єктивно (без врахування її споживача) оцінити кількість і якість інформації. У теорії інформації запропонований ентропійний підхід, Відповідно до нього кількість інформації оцінюється мірою зменшення у одержувача невизначеності (ентропії) у виборі або очікування подій після отримання інформації. Кількість інформації тим більша, чим нижча ймовірність події. Такий підхід добре розроблений для визначення кількості інформації, що передається по каналах зв'язку. Вибір при прийомі здійснюється між символами алфавіту повідомлення. Кількість інформації в переданому по каналах зв'язку повідомленні з  $N$  символів (без врахування зв'язку між символами в повідомленні) розраховується за відомою формулою Шеннона [4]:

$$I = N \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i,$$

де  $P_i$  — ймовірність появи в повідомленні символу  $i$ ;  
 $n$  — кількість символів в алфавіті мови.

Як випливає з формули, кількість інформації, яка вимірюється в двійкових елементах (в бітах, байтах), залежить тільки від кількості і статистики символів, але не залежить як від змісту повідомлення, так і від збільшення інформації у її одержувача. Кількість інформації, яке визначається за цією формулою, однакове при передачі безглузлого тексту або повідомлення життєво важливих для одержувача відомостей. З точки зору передачі таких повідомлень по каналах зв'язку, такий підхід обґрунтований, оскільки витрати на передачу цих повідомлень однакові. А на що витрачені гроші відправника повідомлення і наскільки воно інформативне для одержувача - ці питання до зв'язку відношення не мають.

Аналогічно, коли при телефонній розмові Ваш співрозмовник повідомляє вже відому інформацію, то кількість отриманої Вами інформації є малою, хоча розмова може тривати досить довго. В такому випадку виникає питання - що передавалося в цьому випадку? Очевидно, що здійснювалася передача лише акустичних і електричних сигналів.

Якщо інформацію трактувати як знання, то кількість інформації, що витягується людиною з повідомлення, можна оцінити ступенем зміни її знань. Структуровані знання, представлені у вигляді понять і відносин між ними, називаються тезаурусом. Тезаурус має складну ієрархічну структуру. Поняття і відносини, групуючись, утворюють інші, більш складні поняття і відносини.

Знання окремої людини, організації, держави утворюють відповідні тезауруси. Тезауруси різних організаційних структур включають частини тезаурусів, що входять до складу їх елементів, перш за все, людей. Наприклад, тезаурус організації утворюються з тезаурусів співробітників по тематиці її роботи і інших носіїв інформації (документів, продукції, матеріалів і т. ін.).

Для передачі знань тезауруси повинні перетинатися, тобто вони повинні містити загальні елементи (поняття і відносини між ними). Якщо таких немає, то власники різних тезаурусів просто не зрозуміють один одного. Про таких людей кажуть, що вони розмовляють на "різних мовах". Навіть люди однієї національності часто говорять на "різних мовах", вкладаючи в однакові за формою поняття різний зміст.

Підхід до оцінки кількості інформації за ступенем зміни тезауруса після її отримання, запропонований Ю. А. Шрейдером [5], можна назвати Тезаурусний.

У загальному випадку кількість інформації, що отримується з повідомлення її одержувачем, залежить від співвідношення тезауруса повідомлення і одержувача. Якщо тезаурус повідомлення становить частину тезауруса одержувача або їх тезауруси настільки відрізняються за складом, що не перетинаються, то кількість одержуваної інформації мінімальне. У першому варіанті одержувач не набуває нових знань - тезаурус одержувача не поповнюється, у другому - одержувач не розуміє сенс повідомлення і не може встановити відносини з іншими елементами тезауруса. Подібне відбувається,

коли відбуваються «передчасні» наукові відкриття, які навіть для наукової громадськості є "річчю в собі". В історії науки і мистецтва багато фактів відторгнення громадськістю ідей і творів, які випереджають "свій час". Наприклад, доповідь російського математика Н. І. Лобачевського на засіданні фізико-математичного факультету Казанського університету в 1826 р з викладом основ створеної ним неевклідової геометрії, які в даний час розглядаються як найбільше досягнення математичної думки в історії світової науки, майже ніким не була зрозуміла, а тому і піддана різкій критиці.

Аналогічна ситуація з якістю інформації. Якість інформації характеризується її корисністю. Надзвичайно цінна інформація для одних власників або споживачів може не представляти цінності для інших. Навіть інформація, цінна для всього людства (наприклад, технологія виготовлення ліків від небезпечних хвороб), для окремої здорової людини може не становити інтересу.

Узагальнюючи викладене, циркуляцію інформації в людському суспільстві можна уявити виходячи з наступної моделі.

Тезауруси людини і будь-якої організаційної структури представляють їх капітал. Тому вони прагнуть, по-перше, до збереження (безпеки) свого тезауруса, а, по-друге, до його збільшення. Тезаурус власника інформації може бути збільшений як за рахунок синтезу знань власником шляхом проведення власних досліджень або розробок, так і їх законного або незаконного придбання.

Законне придбання знань можливе шляхом вивчення літературних джерел (самонавчання), запрошення на роботу більш освіченого фахівця, направлення на навчання своїх співробітників, покупку патенту або ліцензії. Придбання знань шляхом розкрадання є незаконним способом збільшення тезауруса.

У природі і суспільстві спостерігається процеси як збільшення тезауруса власника в результаті синтезу інформації, так і вирівнювання тезаурусів різних власників. Вирівнювання тезаурусів відбувається шляхом передачі інформації від тезауруса більшого обсягу тезаурусу меншого обсягу. Крім цілеспрямованої (законної або незаконної) діяльності з передачі інформації мають місце випадкові процеси вирівнювання тезаурусів власників, аналогічно вирівнюванню температури в замкнутому просторі. Цей процес об'єктивно проявляється в будь-якій організації і державі шляхом випадкових, важко контрольованих процесів розповсюдження інформації від джерела з великим об'ємом тезауруса до одержувача, в тому числі несанкціонованого, з меншим об'ємом тезауруса. Потрібні великі витрати і зусилля для уповільнення процесів вирівнювання тезаурусів, так само як, наприклад, важко утримати згусток енергії від розтікання.

При вирівнюванні тезаурусів комерційна ціна інформації зменшується, а цінність інформації може як зростати, так і зменшуватися. Дійсно, закон Ома знають дуже багато людей, але від цього корисність його для практики не зменшується. Але покупець на нього навряд чи вдасться знайти, оскільки



вивчення закону Ома входить в програму обов'язкової шкільної освіти.

На практиці використовують більш грубий і простий так званий об'ємний спосіб вимірювання інформації шляхом підрахунку кількості (в бітах або байтах) символів повідомлення або вимірювання характеристик носія (кількості листів, часу передачі повідомлення та ін.). Але семантика інформації та її цінність при цьому не враховуються.

В інтересах захисту цінної (корисної) інформації її власник (держава, організація, фізична особа) завдає на носій умовний знак корисності інформації, що на ньому міститься, - гриф секретності або конфіденційності. Гриф секретності інформації, власниками якої є держава (державні органи), встановлюється на підставі закону "Про державну таємницю". Для несекретної конфіденційної інформації вводять гриф "для службового користування".

Для позначення конфіденційності комерційної і особистої інформації застосовують різні шкали ранжування. Поширена шкала: "комерційна таємниця - строго конфіденційно" (КТ-СК), "комерційна таємниця - конфіденційно" (КТ-К), «комерційна таємниця» (КТ). Відома шкала: "строго конфіденційно-особливий контроль", "суворо конфіденційно", "конфіденційно". Пропонується також дворівнева шкала ранжування комерційної інформації: "комерційна таємниця" і "для службового користування".

Як підхід для визначення грифу конфіденційності інформації можуть служити результати прогнозу наслідків потрапляння інформації до конкурента або зловмисника, в тому числі:

- величина нанесеного організації економічного і морального збитку;
- реальність створення передумов для катастрофічних наслідків в діяльності організації (підприємства), в тому числі для банкрутства.

### **Види інформації, що захищається**

За змістом будь-яка інформація відноситься до семантичної (в перекладі з латинської - містить сенс) і до інформації про ознаки об'єкта (признакової). Сутність семантичної інформації не залежить від характеристик носія. Зміст тексту, наприклад, не залежить від якості паперу, на якому він написаний, або від фізичних параметрів іншого носія. Семантична інформація - продукт абстрактного мислення людини, вона відображає об'єкти, явища як матеріального світу, так і створювані ним образи і моделі за допомогою символів на мовах спілкування людей.

Мови спілкування включають як природні мови національного спілкування, так і штучні професійні мови. Мови національного спілкування формуються протягом тривалого часу розвитку нації. У ньому застарілі слова поступово відмирають, але з'являються нові, викликані розвитком людства, в тому числі технічним прогресом.

Семантична інформація на мові національного спілкування представляється у вигляді впорядкованої послідовності знаків (літер, цифр) алфавіту цієї мови і записується на будь-якому матеріальному носії. В області

засобів реєстрації та консервації семантичної інформації використовуються носії, що забезпечують більш високу щільність запису і менше енергоспоживання.

Професійні мови створюються фахівцями для економного і компактного відображення інформації. Існує безліч професійних мов: математики, музики, радіоелектроніки, автотранспортного руху, хімії і т. ін. Будь-яка предметна область містить характерні для неї поняття і умовні позначення, часто незрозумілі ненавчений цій мові людині. Для однозначного розуміння цієї мови усіма фахівцями областей науки, техніки, мистецтва та ін., терміни і умовні позначення стандартизуються. В принципі все те, що описано на професійній мові, можна уявити на мові загальнолюдського спілкування, але така форма запису громіздка і незручна для сприйняття інформації людиною. Крім того, використання носіїв різної фізичної природи дозволяє підключати для введення інформації в мозок людини все різноманіття його рецепторів (датчиків). При перегляді кінофільмів, наприклад, основний обсяг інформації глядач отримує через органи зору. Музичний супровід фільму через слуховий канал введення інформації чинить додатковий вплив на емоційну сферу глядача. Робляться спроби доповнити ці канали впливом на органи нюху людини шляхом створення відповідних заходів. У ситуаціях, коли не можна використовувати для інформування людини зорові або акустичні сигнали, або ці канали перевантажені, впливають на його тактильні рецептори. Наприклад, натільний засіб для виявлення записуючого пристрою в кишені співрозмовника інформує про роботу диктофона за допомогою індикатора, що створює вібрацію.

Ознакова інформація описує конкретний матеріальний об'єкт на мові його ознак. Опис об'єкта містить ознаки його зовнішнього вигляду, випромінюваних їм полів і елементарних частинок, складу і структури речовин, з яких складається об'єкт. Джерелами ознакової інформації є самі об'єкти. До них в першу чергу відносяться люди, що цікавлять зарубіжну розвідку або вітчизняного конкурента, нова продукція і матеріали, приміщення і навіть будівлі, в яких може знаходитися конфіденційна інформація. Залежно від виду опису об'єкта ознакова інформація ділиться на інформацію про його зовнішній вигляд (видові ознаки), про його поля (сигнальні ознаки), про структуру і склад його речовин (речові ознаки).

Захищається інформація, що є неоднорідною за змістом, обсягом і цінністю. Отже, захист буде раціональним в тому випадку, коли рівень захисту, а, отже і витрати, відповідають кількості та якості інформації. Якщо витрати на захист інформації вище її ціни, то рівень захисту невиправдано великий, якщо істотно менше, то може призвести до втрати, розкрадання або модернізації інформації, що призведе до значного збитку. Для забезпечення раціонального захисту виникає необхідність структурування конфіденційної інформації, тобто її поділу на так звані інформаційні елементи.

Інформаційний елемент являє собою інформацію на носії, що має досить чіткі межі та задовольняє наступним вимогам:

- має конкретне джерело інформації (документ, людина, зразок продукції і т. Д.);
- міститься на окремому носії;
- має певну цінність.

Структурування інформації проводиться шляхом послідовної деталізації, починаючи з переліків відомостей, що містять таємницю. Деталізація передбачає ієрархічне розбиття інформації відповідно до структури тематичних питань, що охоплюють всі аспекти організації і діяльності приватної фірми або державної структури.

Захист структурованої інформації принципово відрізняється від захисту інформації взагалі. Вона конкретна: ясно, що необхідно захищати (який саме інформаційний елемент), виходячи перш за все з його цінності, хто або що є джерелами і носіями цього елемента, можливі загрози елементу інформації і, нарешті, які способи і засоби доцільно застосовувати для забезпечення його безпеки .

### Демаскуючі ознаки об'єктів захисту

Завдання захисту ознакової інформації розв'язується, перш за все, шляхом запобігання виявлення і розпізнавання об'єктів, що містять ці ознаки. Серед безлічі ознак, притаманних конкретному об'єкту, існують ознаки, які дозволяють виявляти його серед інших схожих об'єктів і розпізнати його приналежність, призначення, функції, властивості, особливості і характеристики.

Ознаки, що дозволяють відрізнити один об'єкт від іншого, називаються демаскуючими. Демаскуючі ознаки об'єкта становлять частину його ознак, а значення їх відрізняються від значень відповідних ознак інших об'єктів. Ознаки, що не збігаються, не належать до демаскуючих. Наприклад, ознака "зростання людини" без вказівки значення цього зростання не є демаскуючою, оскільки вона відноситься до всіх людей.

### Класифікація демаскуючих ознак

Класифікація ознак по різних підставах дана на рис. 7.



Рис.7. Класифікація демаскуючих ознак

Демаскуючі ознаки об'єкта описують його різні стани, характеристики і властивості.

Демаскуючі ознаки поділяються на розпізнавальні ознаки і ознаки діяльності. Розпізнавальні ознаки описують об'єкт в статичному стані: його призначення, приналежність, параметри. Ознаки діяльності об'єктів характеризують етапи і режими функціонування об'єктів, наприклад, етап створення нової продукції: наукові дослідження, підготовка до виробництва, виготовлення нової продукції, її випробування і т. ін. Всі ознаки об'єкта за характером прояву можна розділити на 3 групи:

- зовнішнього вигляду - видові демаскуючі ознаки;
- ознаки випромінювань - сигнальні демаскуючі ознаки;
- матеріально-речові ознаки.

До видових ознак відносяться форма об'єкта, його розміри, деталі об'єкта, тон, колір, структура його поверхні і ін.

Будь-яке матеріальне тіло з температурою вище абсолютного нуля ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) випромінює електромагнітні поля, зумовлені тепловим рухом електронів та атомів речовини. Крім того, об'єкт може містити штучно створені джерела полів або електричного струму. Нарешті, в складі об'єкта можуть входити радіоактивні речовини. Радіоелектронні засоби випромінюють функціональні і побічні електромагнітні поля, механічні рухи частин приладів і машин створюють акустичні поля.

Ознаки випромінювань описують параметри полів і електричних сигналів, що генеруються об'єктом: їх потужність, частоту, вид (аналоговий, імпульсний), ширину спектра і т. ін.

Речові ознаки визначають фізичний і хімічний склад, структуру і властивості речовин матеріального об'єкта. Таким чином, сукупність демаскуючих ознак розглянутих трьох груп представляє модель об'єкта, що описує його зовнішній вигляд, випромінені ним поля, внутрішню структуру і хімічний склад речовин, що містяться в ньому.

Найважливішим показником ознаки є її інформативність. Інформативність можна оцінювати мірою в інтервалі  $[0-1]$ , що відповідає значенню ймовірності виявлення об'єкта за конкретною ознакою. Чим ознака більш індивідуальна, тобто належить меншому числу об'єктів, тим вона більш інформативна.

Найбільш інформативними є іменні ознаки, властиві тільки одному конкретному об'єкту. Такими ознаками є прізвище, ім'я, по батькові людини, папілярний візерунок її пальців, інвентарний номер приладу або зразка меблів. Наприклад, факти про збіг папілярних візерунків пальців різних людей на даний час невідомі.

Інформативність інших демаскуючих ознак, що належать даному об'єкту і названих прямими, коливається в межах  $[0-1]$ . Ознаки, що не належать об'єкту безпосередньо, але відображають його властивості і стан, називаються непрямими. Ці ознаки, як правило, є результатом взаємодії

даного об'єкту з навколишнім середовищем. До них відносяться, наприклад, сліди ніг або рук людини, автомобіля та інших рухомих об'єктів. Сліди фарби або характер деформації поверхні автомобіля в результаті автодорожньої події дозволяють знаходити автомобіль, який втік з місця події. Інформативність непрямих ознак в загальному випадку нижче за інформативність прямих. Однак є винятки, наприклад, інформативність чітких відбитків пальців відповідає інформативності іменних ознак.

За часом прояву ознаки можуть бути:

- постійними, які не змінюються протягом життєвого циклу об'єкта;
- періодичними, наприклад, сліди на снігу;
- епізодичними, що проявляються за певних умов, наприклад, пляма фарби, що випадково з'явилася на поверхні об'єкту.

Набір ознак, що належать об'єкту, утворюють у просторі його ознак структуру  $P_{ст}$ . Її можна представити у вигляді об'єднання всіх демаскуючих ознак об'єктів:

$$P_{ст}(t) = \bigcup_{i=1}^n \prod_i^j(t),$$

де  $\prod_i^j(t)$  - j-е значення i-го признаку в момент часу t.

У загальному випадку для опису об'єкта має значення не тільки кількість і інформативність ознак, але послідовність і час їх прояву. Кожна i-та ознака забезпечує можливість виявлення об'єкта з ймовірністю  $P_i$ . Якщо ознакова структура містить n незалежних ознак, то виявлення об'єктів за допомогою цих ознак збільшується до величини  $Q_n = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$ .

Наприклад, якщо ймовірності виявлення об'єкта по 5 ознаками приймають значення: 0.017; 0.08; 0.021; 0.03; 0.015, то ймовірність виявлення його на основі цих ознак істотно вища і оцінюється величиною більш 0.15.

Якщо ознаки залежні, тобто прояв певної ознаки статистично пов'язаний з проявом іншої, то ймовірність виявлення об'єкта зменшується в порівнянні з варіантом незалежних ознак. Наприклад, значення ознаки "тінь" при спостереженні об'єкта залежить від значення ознаки "розміри" і від взаємного просторового розташування об'єкта і зовнішнього джерела світла.

У загальному випадку ознакова структура являє собою набір незалежних або залежних ознак, про які достеменно відомо, що вони відносяться до даного об'єкту.

**Формою добування інформації є дослідження, тобто:**

- 1) вивчення об'єктів, процесів, явищ;
- 2) аналіз впливу на них різних чинників;
- 3) оцінка взаємодії між об'єктами, явищами.

Інформація добувається з метою одержання переконливого рішення з максимальним ефектом. Метою цих досліджень є визначення конкретного об'єкту та різнобічне достовірне визначення його структури,

характеристик, зв'язків для одержання корисних для діяльності керівника результатів, впровадження їх у життя та отримання бажаного ефекту.

Таким чином, з'являється такий термін як об'єкт захисту. Об'єкти захисту – це об'єкти, на які спрямовані дії розвідки.

До об'єктів захисту відносять:

адміністративно-політичні, економічні, науково-технічні та воєнні установи, організації, підприємства та інші об'єкти, діяльність та матеріали яких (документи, техніка, тощо) викликають зацікавленість у протидіючої сторони;

Одержання інформації про об'єкти здійснюються через так звані джерела відомостей. (*канали витоку інформації!*). Це по-перше:

а) носії цікавих відомостей – особи (люди), які володіють такими відомостями, документальні матеріали, недокументальні матеріали, зразки техніки тощо;

б) об'єкти у складі об'єкта більш високого рангу, діяльність яких може бути джерелом відомостей;

а по-друге сюди відносять також ті сили, які безпосередньо добувають відомості про об'єкти.

### **3. Фізико-технічні принципи захисту інформації**

**Захист** (та добування) інформації про об'єкти та джерела базується на наступних **засадах (принципах)**:

1. Інформація отримується шляхом виявлення демаскуючих, дешифрувальних та інших ознак у цих об'єктів та джерел, а також шляхом формування повідомлень про них. (*визначення повідомлення*)

2. Демаскуючі ознаки з'являються за рахунок фізичних, хімічних, біологічних та інших явищ, що супроводжують наявність та існування (рух) об'єктів чи джерел у просторі та часі:

- виділення речовини (твердої, рідкої, газової, плазми);
- випромінювання енергії;
- вторинне випромінювання (відбивання) енергії (пасивне);
- перевипромінювання енергії (активне і пасивне);
- збурення навколишнього середовища, існуючих фізичних полів.

Так, людина як *об'єкт і канал витоку інформації* має такі демаскуючі ознаки:

а) наслідки життєдіяльності, тобто існування як біологічного об'єкту:

- виділення енергії у вигляді ЕМП (ІЧВ);
- відбивання енергії: ЕМП (радіодіапазон, оптичний діапазон);
- виділення речовини.

б) наслідки розумово-трудова діяльність:

- що знає, думає – біополе головного мозку;
- що говорить – акустичне поле (АП);
- що пише – документи;

- що виготовляє, виробляє – зразки деталей, техніки, творів мистецтва і т. ін.;

в) інформаційна діяльність:

- неспонтанна (умовні знаки) передача інформації;
- спонтанна (міміка, жести, рухи тіла, артикуляція);

Будь-яка споруда, зразок техніки, а тим більш великі об'єкти інформаційних систем мають такі канали витоку і демаскуючі ознаки:

а) самі по собі:	випромінювання енергії ЕМП(ІЧП); відбивання енергії (радіодіапазон, оптичний діапазон) збурення магнітного поля Землі (металеві конструкції)
б) системи енергозабезпечення і різні електротехнічні прилади:	випромінювання енергії
в) системи тепло-, водозабезпе- чення і каналізації:	випромінювання ГАП виділення речовини
г) працюючі механізми:	випромінювання енергії – АП, САП
д) радіоелектронні системи та пристрої	активні: - випромінювання енергії (ЕМП, сигнали) - перевипромінювання енергії пасивні: - випромінювання поза ..... (ЕПП) - перевипромінювання енергії (відплив на .....)
е) наслідки виробничого процесу	документи, хімічні і біологічні речовини, сировина, вироби, відходи та т.ін.
є) люди	

3. Всі ці явища проявляються як зміна стану, як рух, тобто як динамічний процес, і, як правило, породжують нові або змінюють існуючі поля (гравітаційні, електромагнітні, електростатичні, магнітні, акустичні, барометричні, температурні, тиску, густини або розподілу речовини у просторі і т.ін.).

4. Поява або зміна полів, перенос енергії в них здійснюється, як правило, за рахунок коливань та хвильових процесів.

5. Явища, процеси у вигляді хвильових коливань, тонів або інших змін, які використовуються для отримання інформації, називають сигналами. (визначення сигналу)

Усі інші явища (сигнали), які не несуть для даного випадку корисну інформацію, є завадами. (визначення завади)

6. Для одержання інформації враховують реальні процеси та ефекти поширення хвиль у реальному навколишньому середовищі. Так розрізняють

поширення хвиль в однорідних ізотропних лінійних середовищах (прямолінійні з постійною швидкістю), в неоднорідних, в неізотропних, в нелінійних та інших середовищах.

7. Виявлення сигналів на фоні завад та/або інших сигналів, а також розрізнення і розділення сигналів один від іншого здійснюється за рахунок їх відмінностей один від одного. Відмінності можуть розрізнятися за рівнем інтенсивності сигналів, за їх частотою, фазою, часом (тривалістю), кодами, а також за іншими параметрами сигналів, що використовуються, або за іншими ознаками.

8. Обробка інформації (сигналів) здійснюється у вигляді послідовних та/або паралельних інформаційних потоків.

9. На вищих рівнях обробки та узагальнення інформації використовуються різні наукові, лінгвістичні, логічні, математичні, алгоритмічні, організаційно-технічні, а також інші способи та методи обробки сигналів та формування повідомлень з широким використанням обчислювальної техніки.

Вся діяльність із захисту інформації здійснюється з метою запобігання перехопленню інформації постійно і у будь-яких умовах.

### **Висновки**

Все життя на планеті Земля засновано на обміні інформацією, від простого біологічного життя на молекулярно-генетичному рівні до глобального життя людського соціуму через систему «Internet» та інші інформаційні системи. Більш того, зараз ми перебуваємо на тій стадії розвитку, коли інформаційні системи та інформаційні технології змінюють сам зміст життя людей, здійснюють природоформуючий вплив на планеті Земля.

Отже, вміння одержувати, обробляти, передавати, зберігати інформацію та захищати її є найважливішою проблемою та основним завданням спеціалістів інформаційних технологій (систем).

Узагальненою характеристикою явищ, що супроводжують ОР і які пов'язані з виділенням енергії, перевипромінюванням енергії і, в значній мірі, з виділенням речовин, є поля - пружні і електромагнітні.

Всі вони мають загальний теоретичний опис на основі математичної теорії полів.

**Завдання на СРС:** Проаналізувати демаскуючі ознаки (завдання за варіантами).

1. Проаналізувати демаскуючі ознаки людини як джерела інформації.
2. Проаналізувати демаскуючі ознаки ПЕОМ як джерела інформації.
3. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу на відеочастоті.
4. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу на радіочастоті
5. Проаналізувати демаскуючі ознаки звукового сигналу.
6. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу ІЧ діапазону.



7. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу оптичного діапазону.
8. Проаналізувати демаскуючі ознаки будівлі, де працює структура, яка здійснює обробку інформації.
9. Проаналізувати демаскуючі ознаки ПЕОМ як системи обробки інф.
10. Проаналізувати демаскуючі ознаки АТС.
11. Проаналізувати демаскуючі ознаки засобу перехоплення звукової інформації.
12. Проаналізувати демаскуючі ознаки друкованого документу.
13. Проаналізувати демаскуючі ознаки засобу перехоплення інформації у оптичному діапазоні.
14. Проаналізувати демаскуючі ознаки станції стільникового зв'язку.
15. Проаналізувати демаскуючі ознаки електронного носія інформації.
16. Проаналізувати демаскуючі ознаки телеграфного сигналу.
17. Проаналізувати демаскуючі ознаки телефонного сигналу.
18. Проаналізувати демаскуючі ознаки будівлі, де працює структура, яка здійснює зберігання інформації.
19. Проаналізувати демаскуючі ознаки ПЕОМ, яка виконує функції сервера.
20. Проаналізувати демаскуючі ознаки архіву, де зберігають друковані документи.
21. Проаналізувати демаскуючі ознаки телевізійного центру.
22. Проаналізувати демаскуючі ознаки станції радіорелейної лінії зв'язку.
23. Проаналізувати демаскуючі ознаки магнітного носія інформації
24. Проаналізувати демаскуючі ознаки гідроакустичного сигналу.
25. Проаналізувати демаскуючі ознаки радіомовного центру.

### 3. ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ КАНАЛИ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ

За своєю фізичною природою сигнали бувають електричними, електромагнітними, акустичними, і т.ін. Тобто сигналами є електромагнітні, механічні й інші види коливань (хвиль), причому інформація міститься в їх параметрах, що змінюються. Залежно від природи сигнали поширюються в певних фізичних середовищах. У загальному випадку середовищем поширення можуть бути газові (повітряні), рідинні (водні) і тверді середовища. Наприклад повітряний простір, конструкції споруд, сполучні лінії й струмопровідні елементи, ґрунт (земля) і т.п. Технічні засоби розвідки служать для прийому й вимірювання параметрів сигналів.

Класифікація та характеристика технічних каналів витоку інформації, що обробляється ТЗП Згідно з Державним стандартом України (ДСТУ 3396.2-96) «Технічний захист інформації. Терміни та визначення», технічний канал витоку інформації – сукупність носіїв інформації, середовища їх поширення та засобів технічної розвідки. Канал витоку інформації – неконтрольований фізичний шлях від джерела інформації за межі організації чи кола осіб, що володіють охоронюваними відомостями, за допомогою якого можливо неправомірне оволодіння зловмисником інформацією. З технічних каналів витоку інформації найбільшу небезпеку представляє такий НСД, як знімання інформації за рахунок побічних електромагнітних випромінювань і наведень (ПЕМВН). Для перехоплення, обробки й аналізу інформації в КВІ можуть використовуватися різноманітні технічні засоби (ТЗ), а також люди (порушники). Тоді існуючі КВІ в залежності від джерел і одержувачів інформації утворюють чотири основних типи каналів: «людина – людина», «людина – ТЗ», «ТЗ – ТЗ» і «ТЗ – людина». Сказане визначає напрямки потоків інформації. Якщо інформаційний потік поширюється в напрямку від носія до одержувача, то утвориться узагальнений канал витоку, якщо ж інформаційний потік у вигляді явного чи прихованого впливу спрямований по вищевказаним чотирьом типам каналів від порушника до носія інформації, то виникає так званий узагальнений канал інформаційного впливу на носій інформації. В залежності від того, на який параметр носія інформації задумано здійснити вплив, порушником можуть бути застосовані психічні, фізичні, програмно-математичні, радіоелектронні й інші способи і засоби. Параметри, на які задумано здійснити вплив можуть мати різні характеристики матеріальних носіїв, у тому числі й особистісні характеристики головного прямого носія інформації на об'єкті захисту – людини. Виходячи з фізичної природи утворення, технічні канали витоку інформації класифікують як: – візуально-оптичні канали – це, як правило, візуальне спостереження: безпосереднє чи віддалене із застосуванням технічних засобів. Носієм інформації виступає світло, що випускається джерелом конфіденційної інформації, або відбите від нього у видимому, інфрачервоному чи ультрафіолетовому діапазонах; – віброакустичні канали. В акустичних каналах носієм інформації (мова, шуми) виступає звук, що лежить у смузі ультразвуку (понад 20000 Гц), чутного та

інфразвукового (до 16 Гц) діапазонів. Діапазон звукових частот, які чує людина, лежить у межах від 16 до 20000 Гц, а таких, що містяться в людському мовленні, – від 100 до 6000 Гц. Середовищем поширення звуку є повітря, земля, вода, будівельні конструкції (цегла, залізобетон, металева арматура та ін.); – радіоелектронний канал. Носієм інформації є або електромагнітні хвилі в радіочастотному діапазоні, або струм, що проходить через загальне джерело живлення або по колу заземлення; – матеріально-дійсними каналами витоку виступають найрізноманітніші матеріали у твердому, рідкому чи газоподібному або корпускулярному (радіоактивні елементи) вигляді. Пошуки шляхів підвищення дальності добування мовної інформації призвели до появи складених каналів витоку інформації, що містять в собі сполучення вищевказаних каналів, наприклад радіоакустичний, акустооптичний тощо. Технічні засоби прийому, обробки, зберігання й передачі інформації (ТЗП) – це технічні засоби, що безпосередньо обробляють конфіденційну інформацію. До таких засобів відносяться електронно-обчислювальна техніка, режимні АТС; системи оперативного-командного та гучномовного зв'язку; системи звукопідсилення; системи звукового супроводу і звукозапису і т.д.

При виявленні технічних каналів витоку інформації ТЗП необхідно розглядати як систему, що включає основне (стаціонарне) устаткування, кінцеві пристрої, сполучні лінії (сукупність проводів і кабелів, що прокладаються між окремими ТЗП і їхніми елементами), розподільні й комутаційні пристрої, системи електроживлення, системи заземлення. Окремі технічні засоби або група технічних засобів, призначених для обробки конфіденційної інформації разом із приміщеннями, у яких вони розміщуються, становлять об'єкт ТЗП. Під об'єктами ТЗП розуміють також виділені приміщення, призначені для проведення закритих заходів. Поряд із ТЗП в приміщеннях устанавлюються технічні засоби й системи, що безпосередньо не беруть участь в обробці конфіденційної інформації, але використовуються разом із ТЗП і перебувають у зоні електромагнітного поля, створюваного ними. Такі технічні засоби й системи називаються допоміжними технічними засобами й системами (ДТЗС). До них відносяться технічні засоби відкритого телефонного, гучномовного зв'язку; системи пожежної й охоронної сигналізації, електрофікації, радіофікації, часофікації, електропобутові прилади і т.д.

Як канал витоку інформації найбільший інтерес представляють ДТЗС, що мають вихід за межі контрольованої зони (КЗ), тобто зони, у якій виключена поява осіб і транспортних засобів, які не мають постійних або тимчасових пропусків. Крім з'єднувальних ліній ТЗП й ДТЗС за межі контрольованої зони можуть виходити кабелі, які для цих ліній не застосовуються, але проходять через приміщення, де встановлені технічні засоби, а також металеві труби систем опалення, водопостачання й інші струмопровідні металоконструкції. Такі з'єднувальні лінії, кабелі й струмопровідні елементи називаються сторонніми провідниками. Залежно від фізичної природи виникнення інформаційних сигналів, а також середовища

їхнього поширення й способів перехоплення, технічні канали витоку інформації можна розділити на електромагнітні, електричні й параметричні.

### **Особливості витоку інформації технічними каналами**

Під витоком інформації розуміється несанкціоноване перенесення інформації від її джерела до зловмисника. Витік інформації шляхом її розголошення людьми, втратою ними носіїв з інформацією, перенесенням інформації, потоків елементарних частинок, речовин в газоподібному, рідкому або твердому вигляді. Витік інформації порівняно з розкраданням матеріальних об'єктів має ряд особливостей, які треба враховувати при організації захисту інформації: при витоку інформації не виконується закон збереження матерії, внаслідок чого витік не може бути виявлений в результаті зменшення кількості інформації джерела; витік інформації може відбуватися лише при попаданні до зацікавленого в ній несанкціонованого одержувача (зловмисника); при витоку інформації внаслідок розширення кола її споживачів ціна інформації зменшується. При витоку інформації можуть бути відсутні явні ознаки її розкрадання: документи в наявності, відбитки печаток на сейфі не порушені, слідів проникнення в приміщення сторонніх осіб немає. Однак поява непрямих ознак (раптова поява на ринку конкурентного товару з ідентичними споживчими властивостями, зрив з незрозумілих причин виконання договору) змушує причину цих подій розглядати, як витік інформації. Через істотне запізнення виявлення ознак по відношенню до часу витоку інформації завдання хоча б часткової нейтралізації її наслідків стає вельми проблематичною; самі по собі факти втрати документу, розголошення відомостей, поширення носіїв за межі контрольованої зони та інші дії далеко не завжди призводять до витоку інформації.

У загальному випадку можна говорити про витік інформації, як факт порушення її безпеки тільки в тому випадку, якщо вона потрапляє до зловмисника незалежно від того, знає або не знає про це власник інформації. Під витоком слід розуміти не процес поширення носія, а варіант поширення, що закінчується потраплянням інформації до зловмисника. Вихід же носія за межі заданої області створює передумови для витоку інформації і підвищує загрозу її безпеці. Зауваження про несанкціонованого одержувача має принципове значення. Якщо одержувач інформації санкціонований, то мова йде не про витік, а про передачу інформації по так званому функціональному каналу зв'язку, спеціально створеному для забезпечення комунікацій в людському суспільстві. Можливість витоку інформації характеризується ризиком витоку, а цілеспрямована діяльність зі зміни можливості витоку називається управлінням ризиком. Часто розкрадання і витік інформації розглядають як автономні процеси. Якщо під розкраданням і витоком інформації розуміти умисне привласнення чужої власності без дозволу її законного власника, то несанкціоноване отримання інформації в результаті її витоку являє собою один із способів її розкрадання. Коли зловмисник знаходить загублений документ з грифом « таємно » і свідомо, розуміючи що наноситися власнику інформації збиток, продасть його зарубіжній спецслужбі,

то він може бути притягнутий до кримінальної відповідальності за розкрадання держтаємниці.

### **Типова структура та види технічних каналів витоку інформації**

Фізичний шлях несанкціонованого розповсюдження носія інформації до злоумисника утворює канал витоку інформації. Узагальнена структура типового технічного каналу витоку інформації наведена на рис. 7.1. Наприклад, якщо приватну розмову під час наради в кабінеті керівника організації чути в приймальню через нещільно закриті двері, а в приймальні немає сторонніх осіб, то витоку інформації немає, хоча носій інформації (акустична хвиля) виходить за межі контрольованої зони - кабінету. Тільки в тому випадку, коли в приймальні буде знаходитись співробітник організації або відвідувач, який скористається інформацією з почутої розмови в особистих або інших цілях або поділитися нею з іншими зацікавленими в ній людьми, відбувається витік інформації з кабінету керівника. Інформація, що переноситься, може міститися як на носіях, що є одночасно її джерелами, так і носіях-переносниках, на яких вона переписується з джерел. Наприклад, відходи діловодства, що є джерелами інформації, можуть переноситися людьми або стихійними силами в просторі від місця знаходження джерела до злоумисника, утворюючи канал просочування інформації. Тому канал витоку інформації на макротілах містить джерело інформації, середовище поширення носія і несанкціонованого одержувача. Інформація, що переноситься динамічними носіями у вигляді полів (акустичних і електромагнітних) і електричного струму, заздалегідь переписується в джерелі сигналів в їх інформаційні параметри. Середовище її поширення і приймач сигналу утворюють в сукупності канал зв'язку. Завдання каналу зв'язку полягає в передачі вхідної інформації санкціонованому одержувачеві з мінімальними спотвореннями, тимчасовими, енергетичними і іншими витратами. Канал просочування інформації на носіях у вигляді нулів і елементарних частинок містить ті ж елементи, що і канал зв'язку. І відмінність між ними умовна – залежно від одержувача формації. У каналу зв'язку одержувач інформації санкціонований, у каналу витоку — несанкціонований. На вхід каналу зв'язку поступає інформація у вигляді первинного сигналу або саме джерело може бути джерелом інформації. Первинний сигнал є носієм з інформацією від це джерела або з виходу попереднього каналу. В якості джерел сигналів можуть бути: об'єкт спостереження, що відбиває електромагнітні хвилі, у тому числі світло; об'єкт спостереження, випромінюючий власні електромагнітні хвилі в оптичному і радіодіапазонах, викликані тепловим рухом електронів; механізми, що рухаються, і машини, які створюють акустичні сигнали; передавачі функціональних каналів зв'язку; ретранслятори, наприклад заставні пристрої; джерела побічних електромагнітних випромінювань і наведень (ПЕМІН); радіоактивні матеріали. Більшість джерел сигналу є одночасно джерелами інформації про видові, сигнальні або мовні ознаки. Тільки тоді, коли передається семантична інформація, вона поступає на вхід

джерела сигналу на носії у вигляді первинного сигналу. Вказані на малюнку стрілками шляхи входу і виходу інформації означають вхід і вихід первинних сигналів з інформацією. Оскільки інформація від джерела поступає на вхід каналу на мові джерела (у вигляді буквено-цифрового тексту, символів, знаків, звуків, сигналів і т. д.), то передавач робить перетворення цієї форми представлення інформації у форму, що забезпечує запис її на носій інформації, що відповідає середовищу поширення. Наприклад, зловмисник, впроваджуючи заставний пристрій, створить канал зв'язку, який по відношенню до її джерела є каналом просочування інформації. Слід також відмітити, що наявність каналу витоку є необхідним, але недостатньою умовою просочування інформації. За відсутності джерела інформації і її одержувача просочування інформації немає. Аналогічно, наприклад, канал телефонного зв'язку існує постійно, але передача інформації відбувається тоді, коли абоненти на кінцях каналу зв'язку починають розмовляти. У загальному випадку джерело сигналу виконує наступні функції: створює (генерує) поле (акустичне, електромагнітне) або електричний струм, які переносять інформацію; робить запис інформації на носій (модуляцію інформаційних параметрів носія); посилює потужність сигналу (носія з інформацією); забезпечує передачу (випромінювання) сигналу в середовище поширення в заданому секторі простору. Запис інформації робиться шляхом зміни параметрів носія відповідно до рівня первинного сигналу, що поступає на вхід. Якщо носіями інформації є суб'єкти і матеріальні тіла (мікрочастки), то передавач відповідає первинному значенню цього слова — передавати або переносити, тобто виконує функцію носія. Якщо інформацію переносять сигнали (поля, електричний струм і елементарні частинки), то передавачі є джерелами сигналів. Середовище поширення носія – частина простору, в якій переміщається носій від джерела сигналу до його приймача. Середовище поширення може бути у вигляді вільного простору і направляючих ліній. В якості ліній передачі використовуються електричні дроти різної конфігурації, хвилеводи, волоконно-оптичні кабелі, звукопроводи та інші конструкції. Їх просторове положення визначає маршрут руху носія в просторі. При передачі інформації по направляючих лініях функціональних каналів зв'язку забезпечуються менші втрати енергії носія на даремне опромінення простору і велика безпека інформації, ніж при поширенні носіїв у вільному просторі. Проте при цьому різко зростають витрати на створення і експлуатацію таких каналів зв'язку. Приймач сигналу виконує функцію, зворотну функції передавача, а саме: вибір (селекцію) носія з потрібною одержувачеві інформацією; посилення прийнятого сигналу-носія до значень, що забезпечують знімання інформації; знімання інформації з носія (демодуляцію, декодування); перетворення інформації у форму сигналу, доступну одержувачеві (людині, технічному пристрою), і посилення первинних сигналів до значень, необхідних для їх сприйняття людиною і технічним пристроєм. Якщо одержувач інформації людина, то інформація з виходу приймача має бути представлена на мові спілкування людей. Якщо технічний пристрій, то

форма представлення інформації має бути зрозуміла цьому пристрою. У середовищі можуть поширюватися носії з іншою інформацією, які по відношенню до носія з даною інформацією є завадами. Чим ближчі ознаки носія з інформацією, що захищається, і ознаки завад, тим складніше приймачу їх розрізнити і тим сильніше вплив завад на інформацію. Наприклад, якщо частоти завади і радіосигналу відрізняються на величину, більшу за смугу пропускання приймача, то завада буде пригнічена селективними ланцюгами приймача. Якщо їх частоти перетинаються, то після демодуляції завада накладається на сигнал, що призведе до зміни інформаційних параметрів сигналу, аж до повного руйнування інформації. Постійно зростаюча кількість сигналів в радіодіапазоні породила досить серйозну проблему їх електромагнітної сумісності. Для санкціонованих джерел ця проблема вирішується організаційними заходами: законодавчим розподілом шкали радіодіапазону між різними джерелами; контролем за дисципліною зв'язку. Але ці заходи погано працюють стосовно джерел завад. Наприклад, зростання парку автомобілів в місті підвищує насиченість ефіру завадами від їх систем запалення, які повністю не пригнічуються встановленими в них фільтрами. Класифікація каналів просочування інформації за різними класифікаційними ознаками дана на рис.8.

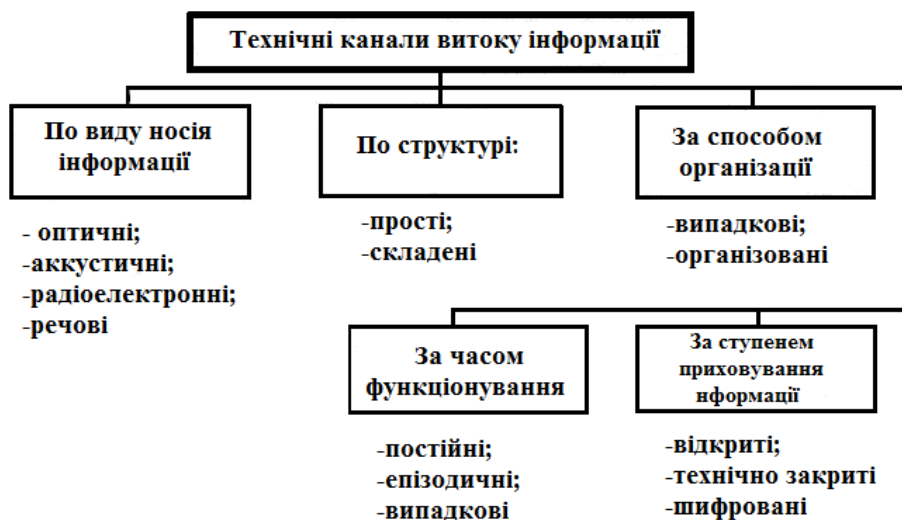


Рис. 8 Типова класифікація фізико-технічних каналів витоку інформації

Основною класифікаційною ознакою технічних каналів просочування інформації є фізична природа носія. За цією ознакою вони діляться на оптичні; радіоелектронні; акустичні; речові. Носієм інформації в оптичному каналі є електромагнітне поле (фотони) в діапазоні 0,46-0,76 мкм (видиме світло) і 0,76-13 мкм (інфрачервоні випромінювання). У радіоелектронному каналі носіями витоку інформації є електричні, магнітні і електромагнітні поля в радіодіапазоні, а також електричний струм, що поширюється по металевих дротах. Діапазон коливань носія цього виду надзвичайно великий: від

звукового діапазону до десятків ГГц. Відповідно до видів носіїв інформації радіоелектронний канал доцільно розділити на 2 підвиди: електромагнітний канал, носіями інформації в якому є електричне, магнітне і електромагнітне поля, і електричний канал, носій інформації в якому – електричний струм. Носіями інформації в акустичному каналі є пружні акустичні хвилі в інфразвуковому (менше 16 Гц), звуковому (16 Гц-20 кГц) і ультразвуковому (понад 20 кГц) діапазонах частот, що поширюються в атмосфері, воді і твердому середовищі. У речовому каналі витік інформації здійснюється шляхом несанкціонованого поширення носіїв з інформацією, що захищається, у вигляді речовини, чернеток документів і використаного копіювального паперу, забракованих деталей і вузлів, що передусім викидаються, демаскуючих речовин та ін. Демаскуючі речовини у вигляді твердих, рідких і газоподібних відходів або проміжних продуктів дозволяють визначити склад, структуру і властивості нових матеріалів або відновити технологію їх отримання. До витоку по цьому каналу віднесено несанкціоноване поширення продуктів розпаду радіоактивних речовин, виявлення і розпізнавання яких зловмисником забезпечують можливість визначення наявності і ознак радіоактивних речовин. Коли йдеться про поширення за межі організації відходів виробництва, слід відрізнити технічний канал витоку від агентурного, у рамках якого винесення носія з інформацією робиться зловмисником, що проник до джерела, завербованим співробітником організації або співробітником, прагнучим продати інформації будь-якому її покупцеві. Межа між агентурним і каналом витоку досить умовна, проте у разі витоку інформації в агентурному каналі носієм інформації є особа, що свідомо здійснює протиправні дії, а в технічному речовому каналі носії вивозяться з організації з метою звільнення її від відходів або відходи поширюються в результаті дії природних сил. У якості таких сил можуть бути повітряні потоки, що разносять газоподібні відходи, що викидаються трубами, або водні потоки річок або водойм, куди скидаються недостатньо очищені рідкі або зважені у воді тверді частки демаскуючих речовин. Кожен з технічних каналів має свої особливості, які необхідно знати і враховувати для забезпечення ефективного захисту інформації від її витоку. Технічний канал витоку інформації складається з передавача, середовища поширення і приймача, є простим або одноканальним. Проте можливі варіанти, коли витік інформації відбувається складнішим шляхом – по декількох послідовних або паралельних каналах. У цьому випадку канал можна назвати складним. При цьому використовується властивість інформації переписуватися з одного носія на інший. Наприклад, якщо в кабінеті ведеться конфіденційна розмова, то витік можливий не лише по акустичному каналу через стіни, двері, вікна, але і по оптичному – шляхом знімання інформації лазерним променем із скла вікна або по радіоелектронному з використанням встановленої в кабінеті радіозакладки. У двох останніх варіантах утворюється складний канал, створений з послідовно сполучених акустичного і оптичного (на лазерному промені) або акустичного і радіоелектронного (радіозакладка – середовище



поширення радіоприймач) каналів. Такі канали коректно назвати акустооптичним і акусторадіоелектронним відповідно.

Для підвищення дальності каналу витоку може також використовуватися ретранслятор, що поєднує функції приймача одного каналу витоку інформації і передавача наступного каналу. Наприклад, для підвищення дальності підслуховування з використанням радіозакладки можна розмістити ретранслятор слабкого сигналу заставного пристрою в портфелі, що здається нібито на зберігання в камеру схову закритого підприємства, а приймати і реєструвати потужніший сигнал ретранслятора на віддаленні в декілька кілометрів у безпечному місці. Такий складний канал називається акустично-радіо, електронно-радіоелектронний. По частоті прояву канали діляться на постійні і епізодичні. У постійному каналі витік інформації носить регулярний характер. Наприклад, наявність в кабінеті джерела небезпечного сигналу може привести до передачі мовної інформації до моменту виявлення цього джерела. Регулярність отримання інформації через такий канал робить його дуже цінним. Тому розвідка дорожить регулярним джерелом інформації і захищає його від контррозвідки. До епізодичних каналів відносяться канали, витік інформації в яких має короткочасний, часто випадковий характер. За способом створення канали витоку можуть бути спеціально організовані і випадкові.

Організовані канали створюються зловмисником для регулярного добування інформації. Наприклад, для підслуховування на великій відстані від джерела мовної інформації організовується канал витоку з приміщення шляхом розміщення в нім заставного пристрою. Характеристики (частота випромінювання, вид модуляції, потужність передавача та ін.) цього каналу відомі зловмисникові. Ці знання дозволяють йому безперервно або в певний час прослуховувати усі розмови, що ведуться в приміщенні. Побічні електромагнітні випромінювання і наведення створюють передумови для утворення випадкових каналів просочування інформації, параметри яких априорі зловмисникові не відомі. Якщо йому вдасться настроїти свій приймач на частоту побічного випромінювання, то виникає випадковий канал витоку інформації. Такий канал може бути дуже інформативним, але випадковий характер його освіти і часу роботи (коли включений випромінюючий технічний засіб) знижує його корисність для зловмисника. По технічному каналу витоку інформація може передаватися не лише у відкритому вигляді, вона може бути і закритою. З метою підвищення скритності сигнал на виході перспективних заставних пристроїв закривається, а канал витоку, що використовує ці пристрої, є технічно закритим. При перехопленні функціональних каналів зв'язки, якими передається шифрована інформація, утворюється шифрований канал просочування інформації. Можливості передачі інформації по технічним каналам залежить від багатьох чинників: енергії сигналу, міри його послаблення в середовищі поширення, чутливості і роздільної здатності приймача зловмисника, рівня перешкод в каналі та ін.

### Контрольні питання

1. Види та підвиди технічної розвідки (оптичної, радіотехнічної)
2. Технології добування інформації.
3. Що таке технічний канал витоку інформації?
4. Що таке природний канал витоку інформації?

## 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ ПОЛІВ ЯК ДЖЕРЕЛ І НОСІЇВ ІНФОРМАЦІЇ

### Електромагнітні явища

Електромагнітні явища лежать в основі фізичної взаємодії між технічними системами обробки, зберігання, передачі інформації та оточуючими їх об'єктами. Ці взаємодії здійснюються шляхом електричних, магнітних та електромагнітних полів. В результаті взаємодії виникають фізичні ефекти, що проявляються у модифікації цих же полів або у зміні параметрів відповідних фізичних об'єктів. Дійсно, у будь-якому радіоелектронному засобі поруч з функціональними полями, які є носіями інформації, закономірно виникають сторонні поля, що несанкціоновано поширюються у просторі, переносячи інформацію, та впливаючи на елементи та кола інших технічних засобів. Даний вплив призводить до виникнення паразитних зв'язків між технічними системами та лініями електромережі, а також з'єднувальними лініями інших технічних засобів та сторонніми провідниками. Паразитні зв'язки, в свою чергу, призводять до проникнення інформаційних сигналів у ці сторонні кола, та як наслідок цього, до утворення каналів витоку інформації. Таким чином, будь-який сучасний технічний засіб, що створює фізичні поля електромагнітної природи, слід розглядати як потенційне джерело несанкціонованого витоку інформації. В даний час, для запобігання витоку інформації широко використовуються технічні засоби захисту інформації, в основі функціонування яких закладені ті ж самі фізичні явища та їх закономірності. В даному розділі ми розглянемо електричні, магнітні та електромагнітні поля об'єктів, явище електромагнітної індукції, процеси випромінювання та поширення електромагнітних хвиль, а також принципи екранування полів електромагнітної природи.

### Електричні поля об'єктів

Поняття електричного поля відноситься до основних, або фундаментальних фізичних понять. Електричне поле є складовою частиною єдиного електромагнітного поля. Існування електричного поля підтверджується всією сукупністю експериментів електродинаміки – немає жодного досліду, якому би протирічила концепція електричного поля. Електричне поле є матеріальним – у тому розумінні, що воно існує незалежно від нашого до нього ставлення. Воно реальне, оскільки можна зареєструвати наслідки взаємодії між зарядами. Проте наявність поля не можна безпосередньо виявити за допомогою органів чуття, його дія проявляється тільки внаслідок його дії на заряди. Тому теоретичне дослідження електричних полів здійснюють за допомогою математичної моделі, що описує значення величини напруженості електричного поля в конкретній точці простору.

В природі існує два види електричних полів: змінні (вихрові) та незмінні у часі (електростатичні поля). Сутність, властивості та характеристики

електричного поля розкриємо за допомогою моделі електростатичного поля. Також розглянемо початкові уявлення про електричний струм та змінні електричні поля.

### Основи електричної взаємодії

Всі тіла в природі утворені з атомів та молекул, які, у свою чергу, складаються з ядер та електронів, що мають електричний заряд. Існують два типи електричних зарядів, які умовно називають позитивними та негативними. Електрони є негативно зарядженими частинками, а ядра атомів заряджені позитивно. Сили електронної взаємодії пов'язують ядро та електрони в єдину систему - атом.

Найменший за величиною електричний заряд, експериментально виявлений у природі, це заряд електрона:  $q_e = -e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Електричний заряд, рівний  $e$ , називають елементарним. Позитивний заряд атомних ядер утворений протонами, що входять до його складу. Заряд протона позитивний і за величиною рівний заряду електрона  $q_p = +e$ .

В кожному атомі сумарний позитивний та сумарний негативний заряди рівні, тому зазвичай тіла є електрично нейтральними. Проте, прикладаючи певні зусилля, можна відірвати електрони від одних тіл, які при цьому стають позитивно зарядженими, та передати їх іншим тілам, які заряджаються при цьому негативно. Такі тіла стають макроскопічно зарядженими.

Електричний заряд будь-якого тіла є квантованим і кратним елементарному заряду  $e$ , тобто змінюється дискретно:

$$\Delta q = \pm N \cdot e$$

де  $N$  — ціле число.

Великою кількістю експериментів доведено, що електричний заряд зберігається. Як приклад, можна навести реакцію анігіляції, тобто реакцію перетворення частинки та античастинки при їх зіткненні у якісь інші частинки, що відрізняються від вихідних. Отже, електрон  $e^-$  з зарядом  $-e$  стикається зі своєю античастинкою — позитроном  $e^+$ , заряд якого позитивний і дорівнює  $+e$ . Внаслідок цього виникають два фотони (фотони — нейтральні частинки, з яких складається електромагнітне випромінювання). Легко бачити, що реакція  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$  задовольняє закон збереження заряду: повний заряд до та після реакції дорівнює нулю.

Між зарядженими тілами виникають особливі сили взаємодії, які називають електричними силами. Однойменні заряди відштовхуються, різнойменні — притягуються.

Експериментальні дослідження взаємодії зарядів дозволили встановити основні властивості та характеристики електричного поля. Розглянемо, як це здійснювалося.

Нехай ми маємо два заряджених (макроскопічних) тіла, розмірами яких можна знехтувати у порівнянні з відстанню між ними. В даному випадку кожне тіло можна вважати матеріальною точкою, або точковим зарядом. Аналізуючи взаємодію точкових зарядів, англійський фізик М. Фарадей

висунув гіпотезу, справедливність якої була повністю підтверджено наступними дослідженнями. Відповідно до ідеї Фарадея електричні заряди не діють один на одного безпосередньо. Кожний з них утворює в оточуючому просторі електричне поле. Поле одного заряду діє на інший заряд, і навпаки. По мірі віддалення від заряду поле слабшає.

Підтверджується це наступним експериментом. Візьмемо віддалений від інших тіл заряд  $q_1$ , що створює електричне поле. Внесемо в це поле другий заряд, що називають пробним, за допомогою якого виявляється та визначається вихідне поле. Поле, створене зарядом  $q_1$ , діє на пробний заряд  $q_2$ , з силою  $\vec{F}_{1,2}$ . При переміщенні заряду  $q_2$ , встановлено, сила  $\vec{F}_{1,2}$  змінюється, але не обертається в нуль. Отже, заряд  $q_1$  створює поле у всьому оточуючому просторі. Аналогічно можна встановити, що заряд  $q_2$ , створює власне поле з силою  $\vec{F}_{2,1}$ , незалежне від поля заряду  $q_1$ . Це означає, що електричне поле не локалізоване у тій чи іншій точці, а існує у певній області простору. Його наявність можна визначити за появою сили, що діє на електричні заряди.

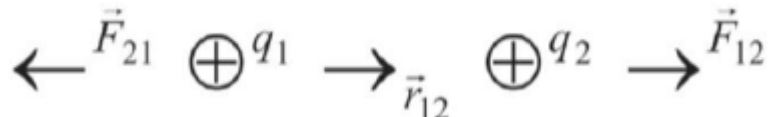


Рис. 3.1. Електричні сили взаємодії між двома однойменними точковими зарядами

Французький фізик Ш. Кулон експериментально встановив, що сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів у вакуумі пропорційна величині кожного з зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані  $r_{12}$  між ними та напрямлена вздовж прямої, що ці заряди з'єднує. При цьому  $\vec{F}_{1,2} = \vec{F}_{2,1}$ .

Отже головна властивість електричного поля - дія його на електричні заряди з певною силою. По дії на заряд встановлюють існування поля, розподіл його в просторі, вивчають всі його характеристики.

Звернемо увагу на ще одну дуже важливу властивість електричного поля. Якщо один з двох взаємодіючих між собою зарядів, що спочатку знаходяться на відстані  $r$  один від одного, швидко перемістити з однієї точки простору в іншу, то другий заряд відчує зміну положення першого заряду не миттєво, а через деякий проміжок часу  $\Delta t = r/c$ , де  $c$  - швидкість світла у вакуумі. Це проявиться в незмінності протягом часу  $\Delta t$  і величини, і напрямку сили, що діє на нерухомий заряд. Таке запізнювання взаємодії вказує на скінченну швидкість її поширення в просторі.

### Види електричних полів, їх порівняльна характеристика

Електричне поле - це одна зі складових електромагнітного поля, особливий вид матерії, який існує навколо тіл або частинок, що мають електричний заряд, а також у вільному вигляді при зміні магнітного поля (наприклад, в електромагнітних хвилях). Воно проявляється в тому, що на будь-який заряд, поміщений в будь-яку точку цього поля, буде діяти сила.

Електричне поле використовується у всіх електротехнічних, радіотехнічних та електрофізичних пристроях (приладах, радіоприймачах, прискорювачах заряджених частинок (і т.ін.).

Електричні поля класифікуються за принципом утворення і властивостям. Сучасній науці відомі два види електричних полів:

- 1) постійні (електростатичні) поля;
- 2) змінні (вихрові) електричні поля.

Електростатичне поле - це векторне поле, ротор якого дорівнює нулю в будь-якій точці, воно називається потенційним (безвихровим) і може бути представлено як градієнт певного скалярного поля (тобто потенціалу).

Змінне електричне поле - це векторне поле, яке може бути представлено як ротор (обертання) іншого векторного поля (магнітного), тому воно називається вихровим, при цьому, якщо його дивергенція повсюди дорівнює нулю, воно називається соленоїдальним, оскільки силові лінії поля замкнені, в іншому випадку несолоноїдальним, оскільки силові лінії поля незамкнені.

Електричне поле, напруженість якого однакова за модулем і напрямком в усіх точках простору, називається однорідним. В обмеженій області простору електричне поле можна вважати приблизно однорідним, якщо напруженість поля всередині цієї області змінюється незначно. В іншому випадку поле називається неоднорідним

### **Закон Кулона**

Сутність закону Кулона полягає в наступному. Два точкових електричних заряди  $q_1$  і  $q_2$  взаємодіють один з одним із силою, напрямленою по прямій, що з'єднує ці заряди, пропорційною значенням цих зарядів, та обернено пропорційною квадрату відстані між ними, яка залежить від електричних властивостей навколишнього середовища.

Сила, з якою діє один заряд на другий, визначається співвідношенням:

$$\vec{F}_{1,2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^3} \vec{r}_{1,2},$$

а сила, з якою діє другий заряд на перший – співвідношенням:

$$\vec{F}_{2,1} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^3} \vec{r}_{2,1} = -\vec{F}_{1,2},$$

де  $\vec{r}_{1,2}$  та  $\vec{r}_{2,1}$  – вектори, чисельно рівні відстані  $r$  між зарядами, які напрямлені від  $q_1$  до  $q_2$  та від  $q_2$  до  $q_1$  відповідно;  $\epsilon$  – абсолютна діелектрична проникність середовища. Нерухомі та незмінні з часом електричні заряди, що знаходяться в деякій області простору, створюють електростатичне поле. Якщо в нього внести деякий пробний точковий електричний заряд, то на нього буде діяти сила, що дорівнює рівнодійній всіх сил, які діють на пробний заряд з боку кожного з інших.

### **Характеристики електричного поля**

Напруженість електричного поля характеризує силу дії поля на пробний точковий електричний заряд. Додатним напрямком дії сили прийнято вважати

напрямок від позитивного заряду (джерела поля) до точки розташування пробного електричного заряду, або в напрямку від більшого заряду до меншого.

Визначимо напруженість електростатичного поля  $\vec{E}$ , створеного точковим зарядом  $q$ , що знаходиться у точці з координатами  $x_q, y_q, z_q$ , в точці спостереження  $a$  з координатами  $x_a, y_a, z_a$ , в якій знаходиться електричний заряд  $q'$ . Відповідно до закону Кулона, на заряд  $q'$  з боку заряду  $q$  діє сила, яка дорівнює:

$$\vec{F} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon r^2} \vec{r}^0,$$

де значення відстані  $r$ :

$$r = \sqrt{(x_q - x_a)^2 + (y_q - y_a)^2 + (z_q - z_a)^2},$$

а  $\vec{r}^0$  – одиничний вектор. Тоді напруженість поля визначимо як силу, що діє на пробний заряд:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^3} \vec{r} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \vec{r}^0 \quad [\text{В/м}], \quad (1)$$

де  $\vec{r} = \vec{r}^0 r$  – радіус-вектор.

Отже, напруженість поля точкового заряду прямо пропорційна його значенню, обернено пропорційна квадрату відстані до точки спостереження та залежить від напрямку. Вектор  $\vec{E}$  напрямлений у бік зменшення заряду. У співвідношенні (1) параметр  $\epsilon$  свідчить про залежність  $\vec{E}$  від властивостей середовища. Це призводить до того, що на межі поділу двох середовищ напруженість поля стає розривною функцією відстані. Для усунення цього ефекту при математичному аналізі доцільно перейти до іншої характеристики поля:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}.$$

Ця нова характеристика, що не залежить від  $\epsilon$ , називається вектором електричної індукції  $\vec{D}$ . З урахуванням співвідношення (1):

$$\vec{D} = \frac{q}{4\pi r^3} \vec{r} = \frac{q}{4\pi r^2} \vec{r}^0.$$

Отже, вектор  $\vec{D}$  залежить тільки від величини заряду і відстані до точки спостереження. Очевидно, що в однорідному ізотропному середовищі вектори  $\vec{E}$  та  $\vec{D}$  завжди будуть співпадати за напрямком.

Розглянемо поле точкового заряду  $q$  та визначимо кількість силових ліній, які перетинають деяку сферичну поверхню радіусу  $r$  з центром у точці розташування заряду. В будь-якій точці такої сфери вектори  $\vec{E}$  та  $\vec{D}$  перпендикулярні елементу її поверхні. Оскільки кількість ліній векторів  $\vec{E}$  або  $\vec{D}$ , що перетинають елемент поверхні сфери, відповідає чисельному значенню  $\vec{E}$  або  $\vec{D}$ , то загальне число ліній через усю сферичну поверхню, тобто потік вектора  $\vec{E}$ , визначають так:

$$N_E = E 4\pi r^2 = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon}.$$

Аналогічно визначають потік вектора  $\vec{D}$ :

$$N_D = D4\pi r^2 = \frac{q}{4\pi r^2} \cdot 4\pi r^2 = q.$$

Отже, кількість силових ліній  $\vec{E}$  або  $\vec{D}$  не залежить від радіуса  $r$  сфери, і ці лінії мають властивість безперервності. Додатними вважають такі лінії, які виходять з об'єму, а від'ємними – які входять в об'єм, обмежений поверхнею. При цьому кількість ліній  $\vec{D}$ , що перетинають довільну замкнену поверхню, дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, які знаходяться усередині об'єму, обмеженого цією поверхнею. При переході з одного середовища в інше вектори  $\vec{E}$  змінюються стрибком, а вектори  $\vec{D}$  залишаються незмінними.

На основі одержаних співвідношень для  $\vec{E}$  та  $\vec{D}$  можна зробити формальний висновок про те, що при значенні  $r=0$  напруженість поля  $E = \infty$ . Але це суперечить фізичному змісту, тому що жодна фізична величина не може приймати нескінченних значень. Справа в тому, що поняття “точковий заряд”, тобто заряджене тіло з “нульовими” розмірами, є умовним. Реальне фізичне тіло завжди має певні скінченні розміри, які потрібно враховувати при малих відстанях до точки спостереження. Тому в наступному параграфі розглянемо співвідношення для напруженості електричного поля зарядів, розташованих всередині замкненої поверхні.

### Робота сил та потенціал електричного поля

Нехай в електростатичному полі точкового заряду  $q$  по деякій траєкторії  $\ell$  переміщується пробний заряд  $q_0$  (рис. 9).

Визначимо роботу, що виконується полем при переміщенні цього заряду.

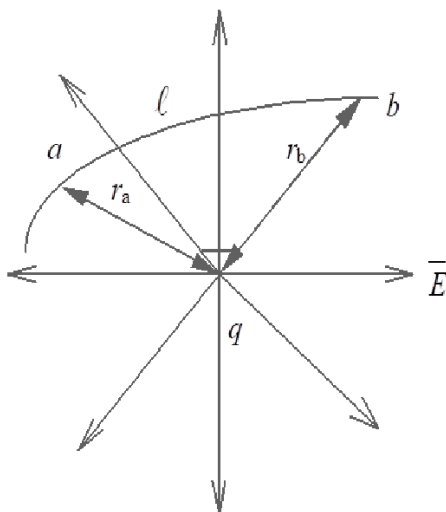


Рис. 9

Сила, яка діє на заряд  $q_0$  з боку заряду  $q$ , за законом Кулона:

$$\vec{F} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon r^3} \vec{r}.$$

Робота сили  $\vec{F}$  на ділянці шляху  $d\ell$ :

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{\ell} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon r^3} r d\ell \cos(\vec{r} \wedge d\vec{\ell}) = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon r^2} d\ell.$$

Повна робота сил поля при переміщенні заряду  $q_0$  з точки  $a$  в точку  $b$  визначається інтегруванням  $dA$  на ділянці  $ab$ :

$$A = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{\ell} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon} \left( \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right). \quad (2)$$



З одержаного співвідношення випливає, що робота сил електричного поля не залежить від форми шляху, а визначається найкоротшою відстанню між початковою і кінцевою точками. Цей висновок зроблений для поля точкового заряду електростатичного поля.

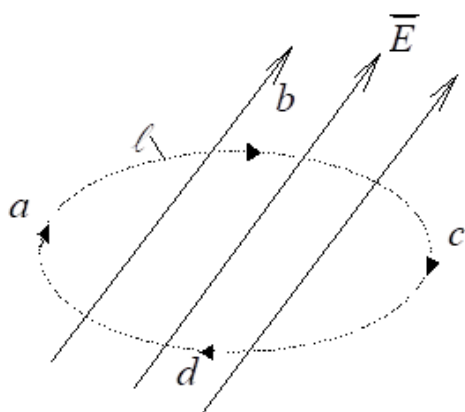
Розглянемо роботу сил електростатичного поля по переміщенню пробного заряду  $q_0$  по замкненій траєкторії (рис. 1.5). За визначенням, силою, яка здійснює роботу, є вектор  $\vec{E}$ . В даному випадку робота обчислюється за допомогою інтегрування  $\vec{E}$  по замкнутому контуру  $\ell$ :

$$A = \oint_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell}.$$

Такий інтеграл називається циркуляцією вектора  $\vec{E}$ . З рис. видно, що

$$A = \oint_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = \int_{abc} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} + \int_{cda} \vec{E} \cdot d\vec{\ell}.$$

На ділянці  $abc$  поле витрачає енергію по переміщенню заряду  $q_0$ , а на ділянці  $cda$  – навпаки, заряд віддає енергію полю. Оскільки робота на ділянці шляху не залежить від форми траєкторії, то можна стверджувати, що



$$\int_{abc} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \int_{cda} \vec{E} \cdot d\vec{\ell},$$

оскільки відстань між початковою та кінцевою точками в обох випадках одна і та ж сама. Таким чином, робота сил по замкнутому контуру (або циркуляція вектора  $\vec{E}$ ) визначається співвідношенням:

$$A = \oint_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = 0. \quad (3)$$

Цей результат очевидний, тому що він випливає із закону збереження енергії.

Оскільки робота по переміщенню заряду є лише функцією відстані між початковою та кінцевою точками, то стає можливим введення скалярного параметра поля – його потенціалу. Різниця потенціалів між двома точками дорівнює взятій з протилежним знаком роботі сил електростатичного поля при перенесенні одиниці кількості електрики з однієї точки в іншу:

$$U_a - U_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \int_b^a \vec{E} \cdot d\vec{\ell}. \quad (4)$$

Уявимо тепер, що точка  $b$  знаходиться на нескінченно великій відстані, тому потенціал в ній дорівнює нулю. Тоді потенціал поля  $U$  в точці  $a$  є роботою сил поля по переміщенню пробного заряду  $q_0$  з нескінченності в дану точку:

$$U = -\int \bar{E} \bar{d}\ell + C, \quad (5)$$

де  $C$  – стала інтегрування, яка враховує початкові умови.

За одиницю потенціалу (в системі одиниць СІ) прийнятий один Вольт. Потенціал поля сукупності зарядів відповідно до принципу суперпозиції дорівнює сумі потенціалів окремих потенціалів:

$$U = \left(-\int \bar{E}_1 \bar{d}\ell + C_1\right) + \left(-\int \bar{E}_2 \bar{d}\ell + C_2\right) + \dots + \left(-\int \bar{E}_n \bar{d}\ell + C_n\right).$$

Таким чином, електростатичне поле визначається як векторами  $\bar{E}$  та  $\bar{D}$ , так і скалярною величиною  $U$  (5), яка є безперечною функцією координат.

### Еквіпотенціальні поверхні. Градієнт потенціалу

Оскільки електростатичне поле характеризується скалярною безперечною функцією – потенціалом, то в просторі завжди можна виділити геометричне місце точок з рівними потенціалами.

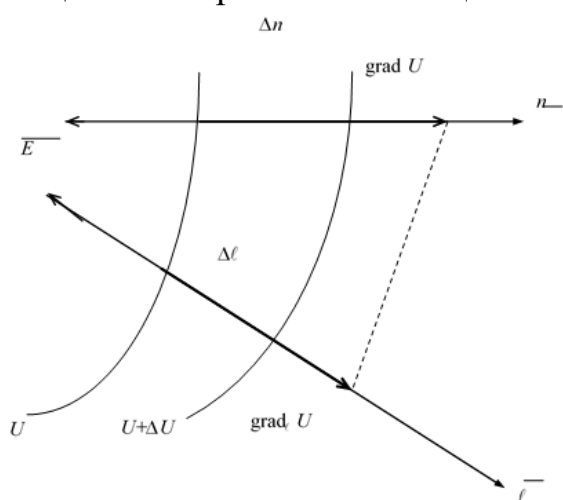


Рис.10

В тривимірному просторі така сукупність точок являє собою поверхню, яку прийнято називати еквіпотенціальною.

Тому електростатичне поле може бути зображено безліччю еквіпотенціальних поверхонь. Щоб з'ясувати положення цих поверхонь, а також їх орієнтацію відносно силових ліній  $\bar{E}$ , використовуємо поняття градієнта потенціалу – важливу характеристику поля, яка визначає зв'язок між  $\bar{E}$  та  $U$ . Як відомо з математики, в загальному випадку градієнт – це вектор, який характеризує

просторову швидкість зміни скалярної величини і напрямлений в бік її збільшення. Тому градієнт потенціалу ( $\text{grad}U$ ) електростатичного поля – це вектор, за модулем рівний швидкості зміни потенціалу і напрямлений в бік його зростання. Тепер неважко уявити, що, оскільки найшвидша зміна потенціалу відповідає найкоротшій відстані між еквіпотенціальними поверхнями  $S_1, S_2$  (рис.10), то вектор  $\text{grad}U$  перпендикулярний дотичній еквіпотенціальної поверхні в конкретній точці і напрямлений в бік поверхні з більшим потенціалом. Відповідно до означення градієнт потенціалу можна записати так:

$$\text{grad}U = \frac{\partial U}{\partial n} \bar{n}^{\circ},$$

де  $\bar{n}^\circ$  – одиничний вектор уздовж нормалі  $n$ . Для визначення градієнта потенціалу в прямокутній системі координат розглянемо спочатку похідну потенціалу  $U$  здовж довільного напрямку  $\bar{\ell}$ .

Прирости відстаней  $\Delta n$  і  $\Delta \ell$  (рис.10) зв'язані між собою очевидним співвідношенням:

$$\Delta \ell = \frac{\Delta n}{\cos(\bar{n} \wedge \bar{\ell})}.$$

Відношення приросту потенціалу  $U$  до приросту відстані  $\ell$

$$\frac{\Delta U}{\Delta \ell} = \frac{\Delta U}{\Delta n} \cos(\bar{n} \wedge \bar{\ell}),$$

а в нескінченно малих величинах це є похідна за напрямком  $\bar{\ell}$

$$\frac{\partial U}{\partial \ell} = \frac{\partial U}{\partial n} \cos(\bar{n} \wedge \bar{\ell}).$$

Останнє співвідношення визначає проєкцію вектора  $\text{grad}U$  на довільний напрям  $\bar{\ell}$ :

$$\text{grad}_\ell U = \frac{\partial U}{\partial \ell}. \quad (6)$$

Таким чином, якщо замість напрямку  $\ell$  вибрати напрямки конкретних координатних осей, одержимо таке загальне співвідношення:

$$\text{grad}U = \bar{i} \text{grad}_x U + \bar{j} \text{grad}_y U + \bar{k} \text{grad}_z U,$$

або

$$\text{grad}U = \bar{i} \frac{\partial U}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial U}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial U}{\partial z}. \quad (7)$$

Відповідно до виразу (1.16) модуль вектора  $\text{grad}U$ :

$$|\text{grad}U| = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2}. \quad (8)$$

Для визначення зв'язку напруженості поля  $\bar{E}$  з потенціалом  $U$  згадаємо співвідношення (1.14), згідно з яким при зменшенні відстані  $ab$  в границі:

$$\partial U = -\bar{E} \partial \ell. \quad (9)$$

При порівнянні виразів (1.16) і (1.19) одержимо загальне співвідношення:

$$\bar{E} = -\text{grad}U. \quad (10)$$

Це співвідношення свідчить про те, що вектор напруженості поля  $\bar{E}$  визначається однією скалярною величиною – потенціалом електростатичного поля  $U$ .

На початку попереднього підрозділу відзначалося, що для розв'язування прямої задачі електростатики рівності Остроградського-Гауса в диференціальній формі було недостатньо. Тепер на основі одержаних співвідношень (1.12) – (1.20) можна створити передумови для розв'язку прямої задачі електростатики – знаходження характеристик поля за заданим розподілом зарядів.

### Рівняння Пуассона–Лапласа

Розв'язання прямої задачі є неможливим до тих пір, поки не визначені три невідомі проекції вектора  $\vec{E}$ , а саме  $E_x, E_y, E_z$ . Так, одержавши додаткові відомості про характеристики поля можна обчислити проекції вектора  $\vec{E}$  як взяті з оберненим знаком проекції вектору  $\text{grad}U$ :

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}.$$

Підставляючи ці співвідношення у вираз (1.10), одержимо:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (11)$$

або в загальному випадку, змінюючи у виразі (1.18)  $\vec{E}$  на  $\text{grad}U$  зі знаком мінус, отримаємо:

$$\text{div grad}U = -\frac{\rho}{\varepsilon}. \quad (12)$$

Співвідношення (1.22) є загальною формою запису рівняння Пуассона, а (1.21) - рівняння Пуассона в прямокутній системі координат. З курсу математики відомий розв'язок рівняння Пуассона у вигляді об'ємного інтегралу:

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \int \frac{\rho}{r} dV, \quad (13)$$

де  $r$  – відстань між елементом  $dV$  та точкою нагляду. Далі за відомим потенціалом  $U$  згідно з виразом (12) визначається напруженість поля  $\vec{E}$ , що і є розв'язком прямої задачі.

Якщо в області простору, який розглядається, заряди відсутні, то рівняння (1.21) і (1.22) набувають вигляду:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0, \quad (14)$$

$$\text{div grad}U = 0. \quad (15)$$

Рівняння (14) або (15) називаються рівнянням Лапласа. Вони застосовуються для розрахунку полів в області простору, вільної від зарядів.

Розв'язування рівняння Лапласа здійснюють у такій послідовності. Представимо розв'язок (1.24) у вигляді добутку, в якому кожний співмножник є функцією лише однієї змінної:

$$U(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z). \quad (16)$$

Підставимо цей умовний розв'язок в початкове рівняння (14):

$$YZ \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + XZ \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + YX \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0.$$

Перетворимо одержаний вираз таким чином, щоб кожний доданок в ньому залежав від однієї змінної:

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0. \quad (17)$$

Співвідношення (17) є рівнянням з трьома невідомими. Природно, що воно має розв'язок тільки при наявності еквівалентної системи з трьох рівнянь.

Тому доцільно припустити, що рівняння (17) має розв'язок лише при умові, що кожний доданок, що входить в нього, є постійною величиною. Для одержання еквівалентної системи з трьох рівнянь, кожне з яких є функцією тільки однієї змінної, виконаємо такі дії.

Диференціюємо вираз (17) за змінною  $x$ . Бачимо, що отриманий диференціал дорівнює нулю. Це означає, що перший доданок у (17) є сталою величиною. Позначимо її через  $K_x^2$ .

Диференціюємо вираз (17) по  $y$  та  $z$ . За результатами зробимо висновки про те, що інші доданки у (17) теж стали величини, наприклад,  $K_y^2$  та  $K_z^2$ . Вони, відповідно до виразу (17), зв'язані рівністю:

$$K_x^2 + K_y^2 + K_z^2 = 0.$$

Таким чином, одержана система з трьох рівнянь, кожне з яких має лише одну невідому. Перепишемо перше рівняння цієї системи з урахуванням виразу (1.27) у вигляді :

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = K_x^2$$

та помножимо його на  $X$  :

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} - K_x^2 X = 0.$$

Розв'язок цього стандартного рівняння здійснюється у показникових функціях.

Приведемо одержане рівняння до такої канонічної форми, за якої його розв'язок записується через гармонічні функції. Оскільки позначення  $K_x^2, K_y^2, K_z^2$  введені довільно, то змінимо їх знаки на обернені. Тоді останнє рівняння набуде вигляду:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + K_x^2 X = 0.$$

Його розв'язок буде таким:

$$X = A_1 \cos(K_x x) + A_2 \sin(K_x x). \quad (18)$$

В співвідношенні (18)  $A_1, A_2$  – деякі сталі.

Аналогічно записуємо інші рівності отриманої системи:

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + K_y^2 Y = 0,$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + K_z^2 Z = 0,$$

та їх розв'язки:

$$Y = B_1 \cos(K_y y) + B_2 \sin(K_y y), \quad (19)$$

$$Z = C_1 \cos(K_z z) + C_2 \sin(K_z z), \quad (20)$$

де  $B_1, B_2, C_1, C_2$  – відповідні сталі.

Підставимо вирази (19), (20) і в (16) та розв'яжемо рівняння Лапласа. Для цього із введених коефіцієнтів два будемо вибирати довільно, тоді третій буде зв'язаний з цим вибором. Нехай  $K_x^2$  та  $K_y^2$  – додатні натуральні числа. Тоді:

$$K_z^2 = -(K_x^2 + K_y^2),$$

або:

$$K_z = j\sqrt{K_x^2 + K_y^2}.$$

Ця уявна величина входить в аргументи тригонометричних функцій – синуса та косинуса. Тоді розв'язок (20) записується через гіперболічні косинус та синус:

$$Z = C_1 \operatorname{ch}(K_z z) + jC_2 \operatorname{sh}(K_z z).$$

Надалі виникає проблема визначення коефіцієнтів  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ , які відповідають єдиному розв'язку рівняння Лапласа. При цьому необхідно розглянути поведінку вектора напруженості електростатичного поля при переході через поверхню розділу двох середовищ. Єдиному розв'язку конкретної задачі буде відповідати такий розв'язок рівняння Лапласа (із безлічі інших його розв'язків), який водночас задовольняє як саме рівняння, так і певні граничні умови, які існують на поверхні розділу двох середовищ.

### Граничні умови електростатики

Якщо силові лінії векторів  $\vec{E}$  або вектор індукції  $\vec{D}$  перетинають границю розділу двох середовищ з різними значеннями  $\varepsilon$ , то  $\vec{E}$  або  $\vec{D}$  можуть бути зображені відносно цієї границі як геометричні суми двох складових: тангенціальної (дотичної) і нормальної (перпендикулярної). Тангенціальна складова – це проекція вектора на границю розділу середовищ, а нормальна складова – це проекція вектора на нормаль до границі. Розглянемо поведінку нормальних складових  $E_n$  і  $D_n$ , тангенціальних складових  $E_\tau$  і  $D_\tau$ , а також потенціалу  $U$  електростатичного поля на границі розділу двох середовищ.

### Граничні умови для тангенціальних складових вектора $\vec{E}$

Нехай силова лінія  $\vec{E}$  перетинає границю розділу двох середовищ зі значенням діелектричної проникності  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  (рис.11). Графічне зображення  $\vec{E}$  робимо поки формальним, а потім його уточнимо. Дослідимо вектор  $\vec{E}$  на наявність вихру, тобто знайдемо циркуляцію  $\vec{E}$  по контуру. Як відомо, від форми контуру циркуляція не залежить, тому для зручності вибираємо контур прямокутної форми  $abcd$ , сторони якого нескінченно малі, а напрямок його обходу – за годинниковою стрілкою. Циркуляція  $\vec{E}$  в цьому випадку є сумарною роботою сил поля по кожній із сторін. За означенням:

$$\oint_l \bar{E} d\bar{l} = 0.$$

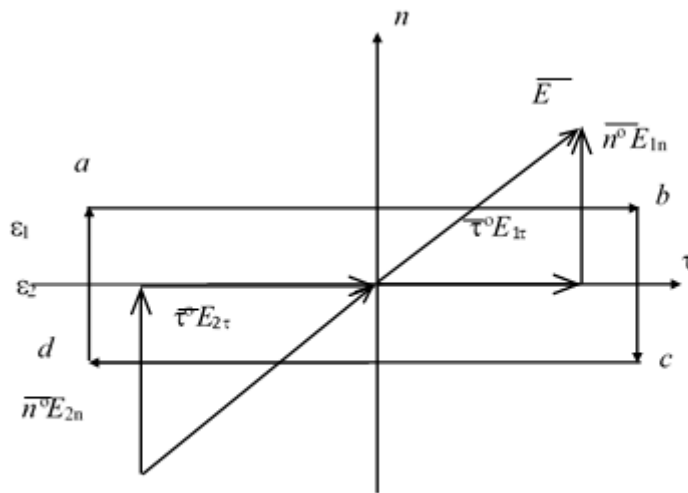


Рис. 11

Це означає, що сума робіт по кожній із сторін контуру :

$$\int_{ab} \bar{E} d\bar{l} + \int_{bc} \bar{E} d\bar{l} + \int_{cd} \bar{E} d\bar{l} + \int_{da} \bar{E} d\bar{l} = 0.$$

Спрямуємо до нуля довжини сторін  $bc$  і  $da$ . Тоді другий і четвертий доданки стають рівними нулю і вираз набуває вигляду:

$$\int_{ab} \bar{E} d\bar{l} + \int_{cd} \bar{E} d\bar{l} = 0$$

В цьому співвідношенні перший доданок характеризує  $\bar{E}$  в першому

середовищі, а другий – в другому. Сторони  $ab$  і  $cd$  рівні нескінченно малій величині ділянки контуру  $d\bar{l}$ , в кожній точці якого можна вважати  $\bar{E} = \text{const}$ . Тоді:

$$\int_{ab} \bar{E} d\bar{l} = \bar{E}_1 \bar{ab}; \quad \int_{cd} \bar{E} d\bar{l} = \bar{E}_2 \bar{cd},$$

де  $\bar{E}_1$  та  $\bar{E}_2$  – вектори напруженості електричного поля на поверхні розділу першого і другого середовищ відповідно. При цьому:

$$E_1 |\bar{ab}| \cos(\bar{E}_1 \wedge \bar{ab}) + E_2 |\bar{cd}| \cos(\bar{E}_2 \wedge \bar{cd}) = 0$$

або, враховуючи, що  $|\bar{ab}| = |\bar{cd}| = dl$ , одержимо:

$$E_1 \cos(\bar{E}_1 \wedge \bar{ab}) - E_2 \cos(\bar{E}_2 \wedge \bar{cd}) = 0.$$

Тут замість знака плюс з'явився знак мінус внаслідок того, що  $\bar{ab}$  і  $\bar{cd}$  протилежно напрямлені. Розглядаючи одержану рівність, можна побачити, що перший доданок є не що інше, як тангенціальна складова  $E_{1\tau}$ , а інший – тангенціальна складова  $E_{2\tau}$ . Тоді гранична умова для тангенціальних складових виглядає наступним чином:

$$E_{1\tau} - E_{2\tau} = 0,$$

або:

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}, \quad (21)$$

тобто тангенціальні (дотичні) складові вектора  $\bar{E}$  рівні за значенням і співпадають з напрямком за двома сторонами поверхні розділу середовищ.

## Граничні умови для нормальних складових вектора $\vec{E}$

Нехай вектор  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  перетинає границю розділу двох середовищ з параметрами  $\epsilon_1$  та  $\epsilon_2$  (рис.12), причому ця границя є поверхнею, яка характеризується густиною зарядів:

$$\sigma = \frac{q_\Sigma}{\Delta S},$$

де  $q_\Sigma$  – сумарний заряд ;  $\Delta S$  – одиниця площі цієї поверхні.

Відповідно

до рівності Остроградського-Гауса потік вектора  $\vec{D}$ :

$$\oint_S \vec{D} \vec{dS} = q_\Sigma.$$

Побудуємо циліндричну поверхню, що перетинає поверхню розділу двох

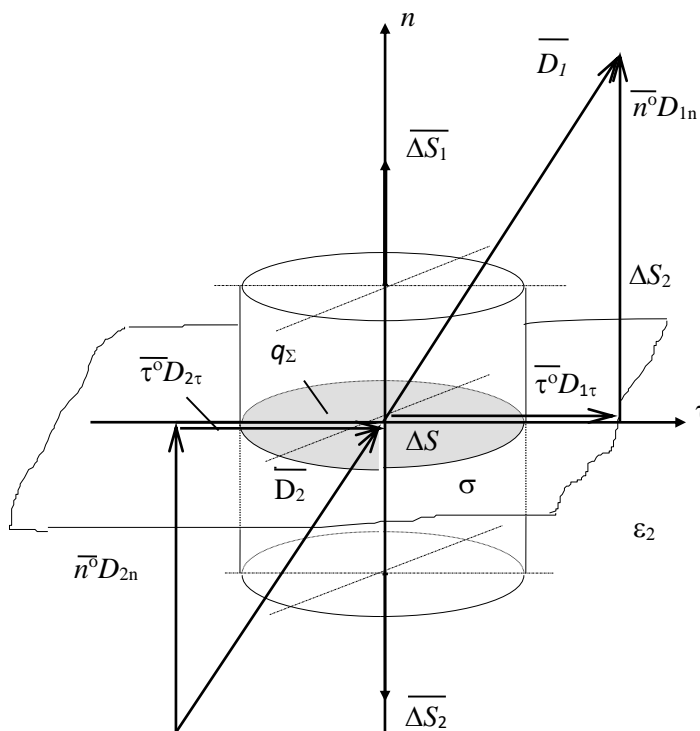


Рис. 12

середовищ (рис. 12).

Нехай площа поперечного перерізу циліндра –  $\Delta S$ , нижньої основи –  $\Delta S_1$ , а верхньої –  $\Delta S_2$ . Твірна циліндра паралельна нормалі  $\vec{n}$ . На площадці  $\Delta S$  розташовано заряд  $\Delta q_\Sigma$ . Тоді потік вектора  $\vec{D}$  є сумою парціальних потоків:

$$\int_{\Delta S_1} \vec{D} \vec{dS} + \int_{\Delta S_2} \vec{D} \vec{dS} + \int_{\Delta S_3} \vec{D} \vec{dS} = q_\Sigma.$$

Оскільки заряд зосереджений на поверхні  $\Delta S$ , то висоту циліндра можна змінювати без шкоди для загального результату. Зменшуємо її до нуля. Тоді третій доданок перетворюється в нуль і

$$\int_{\Delta S_1} \vec{D} \vec{dS} + \int_{\Delta S_2} \vec{D} \vec{dS} = q_\Sigma = \sigma \Delta S$$



оскільки  $\Delta S_1 = \Delta S_2 = \Delta S$ . Очевидно, перший доданок характеризує вектор  $\bar{D}$  в першому середовищі, другий – в другому. Зменшуємо величину  $\Delta S$  настільки, що в кожній її точці вектор  $\bar{D} = \text{const}$ . При цьому

$$\bar{D}_1 \bar{\Delta S}_1 + \bar{D}_2 \bar{\Delta S}_2 = \sigma \Delta S$$

або, скорочуючи на величину  $\Delta S_1 = \Delta S_2 = \Delta S$ , маємо:

$$D_1 \cos(\bar{D}_1 \wedge \bar{\Delta S}_1) + D_2 \cos(\bar{D}_2 \wedge \bar{\Delta S}_2) = \sigma,$$

де перший доданок – нормальна складова  $D_{1n}$ ; другий – нормальна складова  $D_{2n}$ . При переході від  $\bar{\Delta S}_1, \bar{\Delta S}_2$  до  $\Delta S$  знак в останньому виразі змінюється на протилежний, оскільки векторні площадки  $\bar{\Delta S}_1, \bar{\Delta S}_2$  протилежно напрямлені. Тоді гранична умова для нормальних складових вектора  $\bar{D}$  запишеться у вигляді:

$$D_{1n} - D_{2n} = \sigma. \quad (22)$$

Вираз (22) свідчить про те, що нормальні (перпендикулярні) складові вектора  $\bar{D}$  при переході через границю поділу двох середовищ зазнають стрибок на значення поверхневої густини зарядів. Для силових ліній вектора  $\bar{E}$ :

$$\varepsilon_1 E_{1n} - \varepsilon_2 E_{2n} = \sigma. \quad (23)$$

Очевидно, що при  $\sigma = 0$   $D_{1n} = D_{2n}$ , а  $E_{1n}$  і  $E_{2n}$  будуть різними внаслідок нерівності  $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$ .

Отже, на границі поділу двох середовищ тангенціальні складові силових ліній  $\bar{E}$  – незмінні, тоді як нормальні змінюються стрибком. Це приводить до ефекту заломлення силових ліній вектора напруженості електричного поля.

## Граничні умови для потенціалу електричного поля

Вище було показано, що вектор  $\bar{E}$  зв'язаний з потенціалом поля  $U$ . Розглянемо поведінку потенціалу поля на границі поділу двох середовищ. Згадаємо співвідношення, яке зв'язує  $\bar{E}$  та  $U$ :

$$\text{grad} U = -\bar{E},$$

і відносно плоскої границі уявимо, що:

$$\bar{i} \frac{\partial U}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial U}{\partial y} = -\bar{i} E_x - \bar{j} E_y.$$

Тоді:

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}; E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}. \quad (24)$$

Виберемо напрямок координатних осей таким чином, щоб вісь  $x$  лежала в поверхні поділу середовищ, а вісь  $y$  співпадала з напрямком нормалі до граничної поверхні (рис. 13). Тоді, згідно з граничними умовами (21) і (23), запишемо:

$$E_{1x} = E_{2x}; \varepsilon_1 E_{1y} - \varepsilon_2 E_{2y} = \sigma.$$

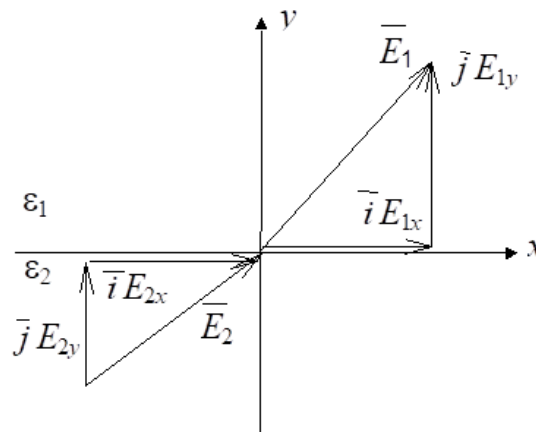


Рис. 13

За аналогією з виразом (24):

$$E_{\tau} = -\frac{\partial U}{\partial \tau}; E_n = -\frac{\partial U}{\partial n}.$$

Отже, як видно з наведеного рисунку, на границі розподілу двох середовищ при  $y = 0$ :

$$\frac{\partial U_1}{\partial \tau} = \frac{\partial U_2}{\partial \tau}.$$

З одержаної рівності на основі граничних умов для тангенціальних складових вектора  $\vec{E}$ , вираженого через відповідні значення  $U$ , одержуємо співвідношення:

$$U_{1\tau}|_{y=0} = U_{2\tau}|_{y=0}, \quad (25)$$

яке свідчить про те, що потенціал на границі поділу середовищ стрибка не зазнає. Для нормальних складових  $\vec{E}$  через відповідні значення потенціалу  $U$ :

$$-\varepsilon_1 \frac{\partial U_1}{\partial n} + \varepsilon_2 \frac{\partial U_2}{\partial n} = \sigma \quad (26)$$

Отже, одержані співвідношення (21) – (26) описують поведінку електростатичного поля при переході з одного середовища в інше. Практичний інтерес представляє частинний випадок, коли одне з середовищ – провідник.

### Граничні умови на поверхні ідеального провідника

Як відомо, провідник відрізняється від діелектрика наявністю вільних електронів - негативних зарядів. Ідеальний провідник – це таке середовище, в якому кількість вільних зарядів в одиниці об'єму нескінченно велика. При внесенні ідеального провідника в електростатичне поле в провіднику відбувається перерозподіл зарядів. Негативні заряди накопичуються на тому боці його поверхні, в який входять силові лінії зовнішнього поля, а позитивні заряди індукуються на протилежній. При цьому всередині провідника утворюється електричне поле, в якому силові лінії напрямлені назустріч по

відношенню до зовнішнього. Перерозподіл зарядів буде продовжуватись до тих пір, поки внутрішнє поле не компенсує зовнішнє в межах об'єму провідника.

Отже, ідеальний провідник – це такий провідник, який має достатню кількість вільних зарядів для компенсації зовнішнього поля в межах всього об'єму провідника. Таким чином, результуюче поле всередині ідеального провідника дорівнює нулю.

В загальному вигляді граничні умови для тангенціальних складових:

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}.$$

Однак, оскільки всередині ідеального провідника поля немає ( $E_{2\tau} = 0$ ), то

$$\bar{E}_{1\tau} = 0.$$

Для нормальних складових вектора  $\bar{E}$  в загальному вигляді:

$$\varepsilon_1 E_{1n} - \varepsilon_2 E_{2n} = \sigma,$$

але за умови ідеальності провідника другий доданок дорівнює нулю, тому

$$\varepsilon_1 E_{1n} = \sigma,$$

звідси:

$$E_{1n} = \frac{\sigma}{\varepsilon_1}.$$

Одержані співвідношення виражають граничні умови на поверхні ідеального провідника: силові лінії електростатичного поля завжди напрямлені по нормалі до поверхні ідеального провідника.

Як ілюстрацію розглянемо електричне поле всередині циліндричного конденсатора. Нехай провідник  $B$  поміщений в порожнину провідника  $A$  (рис. 14). Поле всередині порожнини визначається тільки наявними там

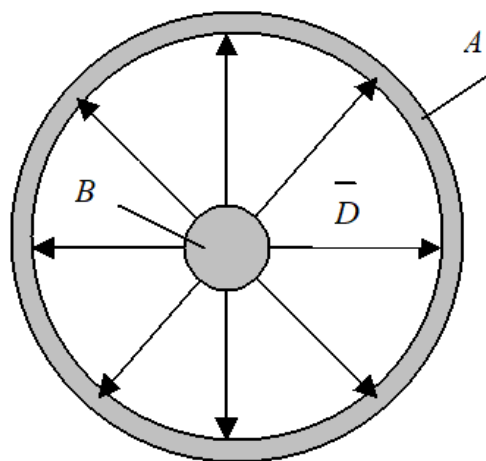


Рис. 14

електричними зарядами і напрямлене завжди по нормалі до поверхні провідників, причому заряди накопичуються на їх поверхнях. Сумарне значення зарядів відповідно з рівністю Остроградського-Гауса:

$$\oint_S \bar{D} \cdot d\bar{S} = q_A + q_B,$$

де  $S$  – площа замкненої поверхні всередині провідника  $A$ ;  $q_A$  і  $q_B$  – заряди тіл  $A$  і  $B$  відповідно. Оскільки всередині провідника поля немає, то  $q_A + q_B = 0$ , звідки  $q_A = -q_B$ . Очевидно, що збільшення заряду  $q = |q_A| = |q_B|$  призведе до збільшення

напруженості і потенціалу електричного поля.

Ємність конденсатора визначимо як модуль відношення заряду до різниці потенціалів між тілами  $A$  і  $B$ :

$$C = \left| \frac{q}{U_A - U_B} \right|.$$

В загальному випадку електрична ємність провідника – це відношення заряду на його поверхні до потенціалу.

Тіло, яке здатне накопичувати заряди, характеризується також енергією, що визначається його електростатичним полем.

### Енергія електростатичного поля

Для визначення енергії електростатичного поля обчислимо роботу, необхідну для його утворення. Припустимо, що заряди, які утворюють поле, переносяться із нескінченності, заряджаючи тіло з об'ємною густиною зарядів  $\rho$  і поверхневою густиною зарядів  $\sigma$ . Розглянемо проміжний етап, коли густини зарядів доведені до значень  $k\rho$  і  $k\sigma$ , де  $k < 1$  – коефіцієнт, рівний  $k = \rho/\rho_{\max} = \sigma/\sigma_{\max}$ , однаковий у всіх точках тіла. При цьому потенціал також буде дорівнювати величині  $kU$ . Робота, яку необхідно виконати для збільшення  $k$  на значення  $dk$ , зв'язана з переносом заряду  $\rho dk dV$  з нескінченності в кожний елемент об'єму і заряду  $\sigma dk dS$  на кожний елемент поверхні. Енергія, яка потрібна для виконання такої роботи, обчислюється за допомогою співвідношення:

$$dW = \int_V \rho dk dV kU + \sum_{i=1}^n \int_S \sigma dk dS kU,$$

де  $\sum_{i=1}^n$  – сума інтегралів по  $n$  зарядженим поверхням.

Повна енергія, необхідна для утворення поля, обчислюється інтегруванням  $dW$  за параметром  $k$  від нуля до одиниці:

$$W = \int_0^1 k dk \int_V \rho U dV + \sum_{i=1}^n \int_0^1 k dk \int_S \sigma U dS.$$

Таким чином, для енергії поля об'ємних і поверхневих зарядів одержимо вираз:

$$W = \frac{1}{2} \int_V \rho U dV + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_S \sigma U dS.$$

Оскільки в ідеальному провіднику об'ємні заряди відсутні, то:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_S \sigma U dS = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n U_i q_i,$$

де  $q_i$  – повний заряд на поверхні  $i$ -го провідника. Частково, при  $n=1$  для одиничного провідника:

$$W = \frac{1}{2} qU = \frac{1}{2} CU^2.$$

Отже, енергія електростатичного поля ідеального провідника пропорційна його електричній ємності і квадрату потенціалу.

## Магнітостатика

Протікання в провіднику постійного електричного струму призводить до появи навколо нього магнітного поля. Основним його параметром є вектор напруженості  $\vec{H}$ , який відповідно до закону Кулона для магнітних зарядів, визначається співвідношенням:

$$\vec{H} = \frac{m}{4\pi\mu r^2} \vec{r}^\circ, \quad (27)$$

де  $m$  – магнітний заряд;  $\mu$  – абсолютна магнітна проникність середовища;  $r$  – відстань до точки спостереження;  $\vec{r}^\circ$  – одиничний вектор.

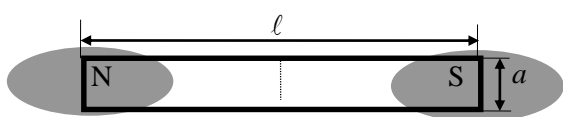


Рис. 15

На відміну від електричного заряду ізольований магнітний заряд одного знаку в природі не існує. Скільки б не зменшували розміри намагніченого тіла, у нього завжди будуть існувати два полюси. Але для побудови теорії магнітостатики за аналогією з електростатикою доцільно отримати магнітний заряд одного знака хоч б формально. Це можна зробити наступним чином: якщо магнітний стрижень (рис. 15) помістити в металеві ошурки, то останні будуть стягнуті до полюсів тим сильніше, чим більше довжина стрижня  $l$  і менше його товщина  $a$ . Припустимо, що  $a \rightarrow 0$ ,  $l \rightarrow \infty$ . При цьому взаємодія полюсів  $S$  і  $N$  стане нескінченно малою, тобто магнітні заряди будуть формально розділеними. Одержана таким чином нескінченно тонка і нескінченно довга магнітна “спиця” названа фіктивною магнітною масою, а рознесені на нескінчену відстань полюси магніту при цьому формально являють відокремлені магнітні заряди протилежних знаків, а значення будь-якого з них входить у співвідношення (27).

## Закон Біо–Савара

Напруженість магнітостатичного поля  $\vec{H}$  залежить від параметра середовища  $\mu$ . Для усунення цієї залежності введемо нову характеристику магнітостатичного поля – вектор магнітної індукції:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \frac{m}{4\pi r^2} \vec{r}^\circ. \quad (28)$$

Визначення характеристик магнітостатичного поля за заданим значенням і розподілу в просторі постійного струму визначає сутність прямої задачі магнітостатики. В основі розв'язання цієї задачі лежить закон Біо–Савара, відкритий експериментальним шляхом.

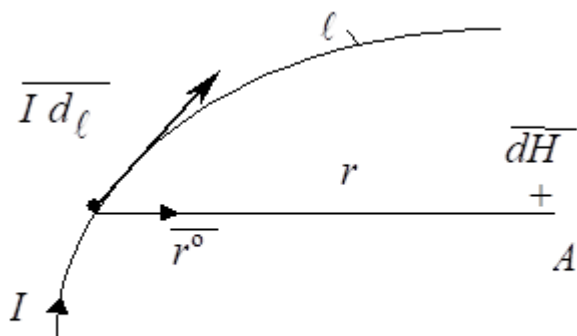


Рис. 16

Розглянемо нескінченно тонкий провідник довжиною  $\ell$  з постійним струмом  $I$  (рис.16). Виділимо елемент довжини провідника  $d\ell$ , при цьому добуток  $\overline{Id\ell}$  розглядається як вектор і називається елементом струму. Він збуджує в точці спостереження  $A$  елементарне магнітостатичне поле напруженістю  $\overline{dH}$ , яке визначається за законом Біо–Савара векторним добутком:

$$\overline{dH} = \frac{\overline{Id\ell} \times \overline{r^0}}{4\pi r^2}, \quad (29)$$

де  $\overline{r^0}$  – одиничний вектор, напрямлений на точку  $A$ ;  $r$  – відстань від елемента струму до точки спостереження  $A$ .

Закон Біо–Савара свідчить про те, що напруженість магнітостатичного поля, яке збуджується елементом постійного струму, прямо пропорційна величині цього елемента, обернено пропорційна квадрату відстані до точки спостереження і залежить від напрямку до неї. При цьому добуток  $\overline{Id\ell}$  є векторним і спільно з  $\overline{r^0}$  визначає модуль і напрям елемента  $\overline{dH}$ . Для переходу від  $\overline{dH}$  до  $\overline{H}$  необхідно співвідношення (29) проінтегрувати по довжині провідника  $\ell$ . Розкриваючи в співвідношенні (29) векторний добуток і враховуючи те, що модуль  $\overline{r^0}$  дорівнює одиниці, одержимо:

$$dH = \frac{Id\ell}{4\pi r^2} \sin(\overline{Id\ell} \wedge \overline{r^0}),$$

звідки напруженість магнітного поля:

$$dH = \int \frac{Id\ell}{4\pi r^2} \sin(\overline{Id\ell} \wedge \overline{r^0}). \quad (30)$$

Розглянемо приклад практичного застосування закону Біо–Савара для визначення напруженості постійного магнітного поля, яке створюється прямолінійним нескінченно довгим і нескінченно тонким провідником з електричним струмом  $I$ . Позначимо:  $R$  – найкоротша відстань від точки спостереження  $A$  до провідника довжиною  $\ell$  (рис.17),  $r$  – відстань від точки  $A$  до елемента струму  $\overline{Id\ell}$ ,  $\varphi$  – кут, який характеризує напрямком на точку  $A$ ,  $\psi$  – кут між нормаллю до провідника і напрямком на точку  $A$ ,  $d\ell_{\psi}$  – проекція  $d\ell$

на нормаль до  $\vec{r}^0$ . Тоді відповідно до співвідношення (30) модуль вектора напруженості

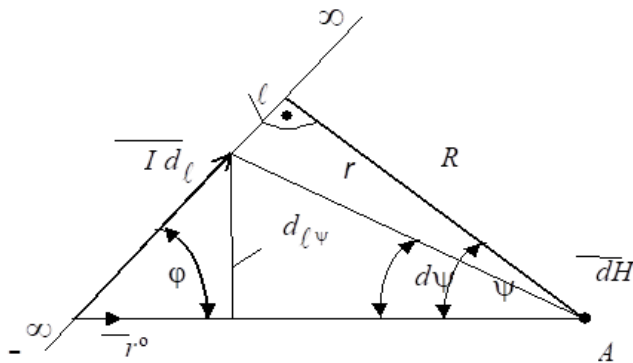


Рис.17

$$H = \frac{I}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \varphi}{r^2} dl,$$

Враховуючи введені позначення,  $dl_{\psi} = dl \sin \varphi$ .

Внаслідок нескінченної малості  $dl$  відстані від кінця і початку вектора  $\vec{ldl}$  до точки A однакові і рівні  $r$ . При цьому  $dl_{\psi} = r \sin d\psi \approx rd\psi$ .

Отже, переходячи від інтегрування по довжині  $l$  до інтегрування по куту  $\psi$ , одержимо:

$$H = \frac{I}{4\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\psi}{r}. \quad (31)$$

Виражаючи відстань  $r$  до точки A через величину  $R$ :

$$r = \frac{R}{\cos \psi}$$

і підставляючи її в вираз (31), одержимо:

$$H = \frac{I}{4\pi R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \psi d\psi = \frac{I}{2\pi R}. \quad (32)$$

Співвідношення (32) свідчить про те, що лінія вектора  $\vec{H}$  прямолінійного провідника зі струмом має вигляд кола радіусу  $R$ .

Застосування закону Біо–Савара для аналізу поля провідника кінцевої товщини або всередині його супроводжується труднощами інтегрування по об'єму, оскільки цей закон справедливий лише для нескінченно тонких провідників. Тому є необхідність в розробці на основі закону Біо–Савара способу розрахунку магнітного поля “товстого” провідника з постійним струмом. Такий спосіб ґрунтується на законі повного струму, який розглянемо нижче. Інтегральну форму цього закону застосовують для розв'язку прямої задачі магнітостатики.

### Закон повного струму в інтегральній формі

Розглянемо магнітостатичне поле нескінченно тонкого провідника зі струмом  $I$ , напрямленим “від нас” (рис.18). При цьому крива, яка в кожній точці має дотичну, що співпадає з вектором  $\vec{H}$  за напрямком, є силовою лінією напруженості магнітного поля. На рис. 18 позначимо її пунктиром. В

даному випадку сімейство силових ліній магнітостатичного поля - концентричні кола, а їх напрям визначається правилом правого гвинта з поступальним рухом в напрямку струму  $I$ .

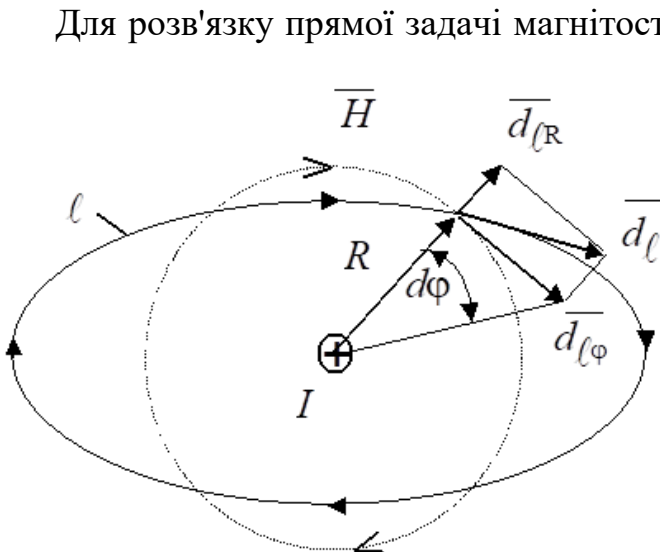


Рис. 18

Для розв'язку прямої задачі магнітостатики необхідно оцінити роботу сил магнітостатичного поля по переміщенню пробного заряду уздовж замкненої траєкторії  $\ell$ . Ця робота в загальному випадку визначається інтегралом по замкненому контуру  $\ell$  довільної форми (рис. 18):

$$A = \oint_{\ell} \vec{H} \vec{dl}$$

і називається циркуляцією вектора  $\vec{H}$ . Контур  $\ell$  може охоплювати струм  $I$ , а може і не охоплювати його. Проаналізуємо обидва випадки.

Випадок 1: контур  $\ell$  охоплює струм  $I$  (рис.18). Позначимо через  $R$  відстань від провідника до елемента контуру  $dl$ , через  $dl_R$  і  $dl_\phi$  – проєкції відрізка  $dl$  на напрям  $R$  і нормаль до нього відповідно. Циркуляція вектора  $\vec{H}$  може бути представлена сумою інтегралів:

$$\oint_{\ell} \vec{H} \vec{dl} = \oint_{\ell} \vec{H} \vec{dl}_R + \oint_{\ell} \vec{H} \vec{dl}_\phi, \quad (33)$$

оскільки геометрична сума векторів  $\vec{dl}_R$  і  $\vec{dl}_\phi$  дорівнює  $\vec{dl}$ . Розкриваючи в підінтегральних виразах правої частини (33) скалярні добутки векторів і враховуючи, що кут між векторами  $\vec{H}$  і  $\vec{dl}$  дорівнює нулю, одержуємо такі співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} \oint_{\ell} \vec{H} \vec{dl}_\phi &= H dl_\phi \cos(0) = H dl_\phi, \\ \oint_{\ell} \vec{H} \vec{dl}_R &= H dl_R \cos(90^\circ) = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (34)$$

Згідно з рис.18  $dl_\phi = R \sin d\phi \approx R d\phi$ . При цьому на основі виразів (32), (33) і (34) одержуємо:

$$\oint_{\ell} \vec{H} \vec{dl} = \oint_{\ell} \vec{H} \vec{dl}_\phi = \frac{I}{2\pi R} \oint_{\ell} R d\phi = \frac{I}{2\pi R} \phi \Big|_0^{2\pi},$$

звідки:

$$\oint_{\ell} \vec{H} \vec{dl} = I.$$

Це означає, що циркуляція вектора  $\vec{H}$  визначається значенням струму, охопленого контуром  $\ell$ . Якщо контур  $\ell$  охоплює  $i$  провідників із струмами  $I_i$



то відповідно з принципу суперпозиції циркуляція сумарного магнітного поля  $\overline{H}$  буде дорівнювати алгебраїчній сумі цих струмів:

$$\oint_{\ell} \overline{H} \overline{d\ell} = \oint_{\ell} \sum_{i=1}^n \overline{H}_i \overline{d\ell} = \sum_{i=1}^n I_i = I_{\Sigma},$$

Випадок 2: контур  $\ell$  не охоплює струму  $I$  (рис.19). Проведемо від провідника до контуру дві прямі, які дотикаються до нього в точках 1 і 2. При цьому замкнений контур  $\ell$  буде розділений на дві траєкторії  $1a2$  і  $2b1$ . Тоді циркуляцію вектора  $\overline{H}$  можна представити у вигляді суми:

$$\oint_{\ell} \overline{H} \overline{d\ell} = \frac{I}{2\pi} \int_{1a2} d\varphi + \frac{I}{2\pi} \int_{2b1} d\varphi,$$

в якій перший інтеграл є робота поля по переміщенню пробного магнітного заряду по траєкторії  $1a2$ , а другий – по траєкторії  $2b1$ . Оскільки кути  $1a2$  та  $2b1$  рівні по значенню і протилежні по знаку, тому

$$\oint_{\ell} \overline{H} \overline{d\ell} = \frac{I}{2\pi} \int_{1a2} d\varphi - \frac{I}{2\pi} \int_{1b2} d\varphi = 0.$$

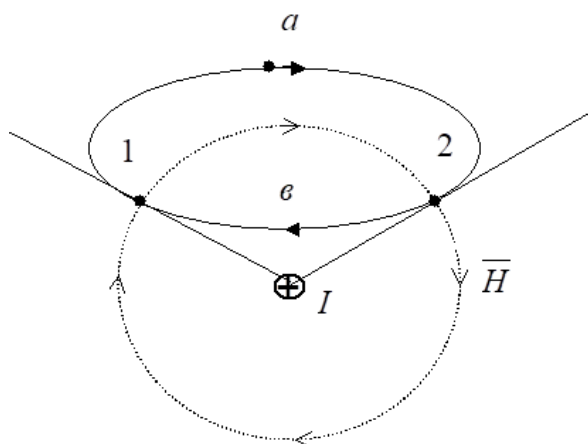


Рис. 19

Отже, якщо контур  $\ell$  не охоплює струму, то робота, що виконана полем по переміщенню уздовж контуру пробного магнітного заряду, дорівнює нулю.

Об'єднуючи результати обох випадків, сформулюємо закон повного струму в інтегральній формі: циркуляція вектора  $\overline{H}$  по замкненому контуру  $\ell$  чисельно дорівнює алгебраїчній сумі струмів, охоплених цим контуром, тобто визначається виразом

$$\oint_{\ell} \overline{H} \overline{d\ell} = I_{\Sigma} \quad . \quad (35)$$

На основі цього закону можна розв'язувати пряму задачу магнітостатики – за відомими значеннями електричних струмів знайти напруженість створеного ними магнітостатичного поля.

Однак існує ще й обернена задача – за відомими параметрами магнітостатичного поля необхідно знайти в просторі розподіл електричних струмів, які є джерелами цього поля.

За допомогою (2.9) не можна відповісти на питання про наявність струму всередині контуру, оскільки алгебраїчна сума струмів може дорівнювати нулю і при їх наявності, якщо існуючий сумарний струм одного знаку усередині контуру дорівнює сумарному струму іншого знаку. Але ж при розв'язуванні оберненої задачі необхідно знайти значення струму в кожній точці простору.

Тому необхідно перейти до нескінченно малої частини області простору, тобто до закону повного струму в диференціальній формі.

### Закон повного струму в диференціальній формі

Розглянемо область простору, в якій існує магнітостатичне поле  $\vec{H}$ . Необхідно визначити значення струму в певній точці. Для цього замкнений контур  $\ell$ , в якому знаходиться точка, зменшуємо, “стягуючи” його до неї. Площа контуру при цьому буде прямувати до нуля. Якщо виявиться, що в цьому випадку циркуляція  $\vec{H}$  не дорівнює нулю, то це означає, що в точці, яка нас цікавить, є електричний струм, а якщо циркуляція  $\vec{H}$  дорівнює нулю, то струму в цій точці немає.

Розбиваємо площину  $S$ , обмежену контуром  $\ell$ , на нескінченно малі площадки площиною  $\Delta S$ , обмежені контурами  $\Delta \ell$  (рис.20).

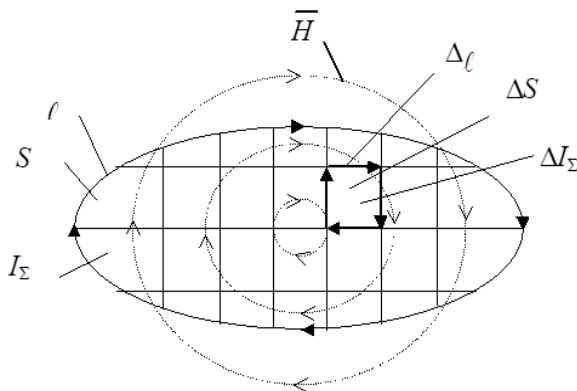


Рис. 20

Всередині контуру  $\Delta \ell$  може виявитись струм  $\Delta I_{\Sigma}$ . Тоді відповідно до виразу (35):

$$\oint_{\Delta \ell} \vec{H} d\vec{\ell} = \Delta I_{\Sigma}.$$

Інтеграл в лівій частині як математичний оператор має назву циркуляції, а права частина виражає частину сумарного струму, що підлягає дослідженню.

Віднесемо обидві частини цієї рівності до величини  $\Delta S_n$  і перейдемо до границі за умови, що  $\Delta S_n \rightarrow 0$ :

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\oint \vec{H} d\vec{\ell}}{\Delta S_n} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I_{\Sigma}}{\Delta S_n}. \quad (36)$$

Ліва частина виразу (36) є циркуляцією  $\vec{H}$  на одиниці поверхні  $\Delta S_n$  і проекцією ротора вектора  $\vec{H}$  на нормаль  $\vec{n}$  до елементарної площадки  $\Delta S$ , а права частина – проекцією вектора густини струму провідності  $\vec{j}$  на ту ж нормаль. Тому  $\text{rot}_n \vec{H} = j_n$ . Оскільки вектор  $\vec{n}$  може бути сполучений з будь-якою координатною віссю, то в загальному вигляді:

$$\vec{i} \text{rot}_x \vec{H} + \vec{j} \text{rot}_y \vec{H} + \vec{k} \text{rot}_z \vec{H} = \vec{i} j_x + \vec{j} j_y + \vec{k} j_z$$

або:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}. \quad (37)$$

Розглянемо докладніше диференціальний оператор  $\text{rot } \bar{H}$ . Нехай вектор  $\bar{j}$  є довільно орієнтованим відносно координатних площин, але перетинає

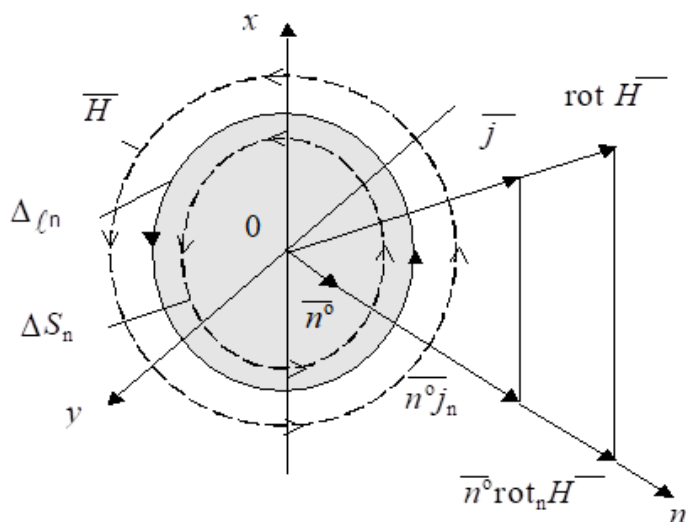


Рис. 21

площину  $ХОУ$ , як показано на рис. 21. Навколо струму виникає магнітостатичне поле, проекція силових ліній якого на площину  $ХОУ$  зображена пунктиром. Суцільною лінією зображено проекцію  $\Delta \ell_n$  контуру  $\ell$  на площину  $ХОУ$ . Ця проекція обмежує елементарну площину  $\Delta S_n$ . Згідно зі співвідношеннями (37) вектори  $\text{rot } \bar{H}$  і  $\bar{j}$  співпадають за напрямком.

На рис. 2.7 через  $n$  позначено нормаль до координатної

площини  $ХОУ$ . На ній відмічені проекції  $\text{rot}_n \bar{H}$  і  $j_n$ , які зв'язані співвідношенням (37).

Ротор  $\bar{H}$ , як вектор, може бути виражений сумою своїх проекцій на координатні вісі:

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{i} \text{rot}_x \bar{H} + \bar{j} \text{rot}_y \bar{H} + \bar{k} \text{rot}_z \bar{H}.$$

Таким чином ротор вектору  $\bar{H}$  – це вектор, проекція якого на нормаль до довільної площини дорівнює границі відношення циркуляції  $\bar{H}$  по замкненому контуру до площі, обмеженій цим контуром, при її прямуванні до нуля.

На основі викладеного вище, застосовуючи математичну форму запису оператора “ротор” в прямокутній системі координат, одержимо співвідношення:

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{i} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) + \bar{j} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) + \bar{k} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) = \bar{j}, \quad (38)$$

яке відображає закон повного струму в диференціальній формі: ротор вектора напруженості магнітостатичного поля визначається густиною електричного струму, що створює це поле. В цьому співвідношенні перший доданок є проекцією  $\text{rot}_x \bar{H}$ , другий проекцією –  $\text{rot}_y \bar{H}$ , а третій – проекцією  $\text{rot}_z \bar{H}$ . Таким чином, обернена задача магнітостатики розв'язується шляхом диференціювання за осями координат проекцій відомого вектора напруженості  $\bar{H}$  і наступним обчисленням за формулою (38) густини струму, що його створив.

## Характеристики звукового поля. Шум, ультразвук та інфразвук

Виробниче середовище нерідко наповнене різноманітними за силою і частотою звуками.

Впорядковані звукові сигнали найчастіше застосовують для зосередження уваги працівника (попереджувальні сигнали і сигнали небезпеки) та для інформування працівника, який знаходиться в умовах недостатньої видимості об'єкта управління.

Невпорядковані звуки сприймаються як шум. Тому шум часто називають несприятливим звуком.

**Звук** — це слухове відчуття, що викликається механічними коливаннями. Звук, як фізичне явище, являє собою коливання частинок пружного середовища (газу, рідини, твердого тіла), які поширюються в ньому у вигляді **хвиль**.

Звук, що поширюється у повітряному середовищі, називається **повітряним звуком**, а в твердих тілах - **структурним звуком**.

Простір, в якому поширюються звукові хвилі, називається **звуковим полем**. Основними фізичними параметрами звукового поля (звукових хвиль) є : звуковий тиск, інтенсивність, частота, коливальна швидкість та звукова потужність джерела звуку.

**Звуковим тиском**  $P$  вважають різницю між атмосферним тиском і тиском, що виник в результаті коливань, створених джерелом звуку, в даній точці звукового поля. Звуковий тиск вимірюється в паскалях (Па). Звуковий тиск є *мірою оцінки звукової хвилі в певній точці простору*. При поширенні звукової хвилі частинки повітря починають коливатися відносно положення рівноваги. Швидкість, з якою коливаються частинки середовища відносно свого положення рівноваги, називається **коливальною швидкістю**  $v$ , м/с:

$$v = \frac{p}{\rho c}$$

де  $p$  – звуковий тиск, Па

$\rho$  – питомий акустичний опір середовища, Па • с/м.

Коливальна швидкість є значно меншою за швидкість поширення звукової хвилі. Швидкість звуку в повітрі дорівнює  $c = 344$  м/с.

**Частота звуку** характеризується числом коливань звукової хвилі за одиницю часу секунду і вимірюється в герцах (Гц).

За частотою звукові (акустичні) коливання поділяють на:

- *інфразвукові* з частотою менше ніж 20 Гц не чутні людиною
- *звукові*, які сприймаються органом слуху людини від 20 до 20 000 Гц
- *ультразвукові* — понад 20 000 Гц.

У свою чергу, звуковий діапазон прийнято поділяти на низькочастотний – до 400 Гц, середньостатистичний – 400 – 1000 Гц, високочастотний – понад 1000 Гц.

За еталон прийнято звук з частотою коливань 1000 Гц.

Інтенсивність звуку або сила звуку, визначається кількістю енергії, що проходить через одиницю площі, Вт/м<sup>2</sup>

Інтенсивність звуку пов'язана зі звуковим тиском:

$$I = \frac{pv}{2} = \frac{p^2}{2\rho c} = \frac{v^2 \rho c}{2}$$

де  $p$  – звуковий тиск, Па

$\rho$  – густина середовища(повітря), кг/м<sup>3</sup>

$c$  – швидкість звуку (звукової хвилі) всередині, м/с

Мінімальна величина звуковою тиску та інтенсивності, яка ледве відчуваються органом слуху людини, називається **порогом чутності або умовним нулем чутності**.

### Контрольні питання

1. Які поля називаються скалярними, а які – векторними?
2. Що таке силова лінія і екіпотенційна поверхня?
3. Який причинно-наслідковий зв'язок між напруженістю електричного поля і механічною силою взаємодії двох зарядів?
4. Як формулюються пряма і зворотна задачі електростатики?
5. Сформулюйте і запишіть рівності Остроградського-Гауса в інтегральній і диференціальній формах. Чому перше з них не може бути використане для розв'язання зворотної задачі електростатики, а друге - для розв'язання прямої задачі?
6. Який фізичний зміст таких диференціальних операцій, як дивергенція вектора, градієнт потенціалу, ротор вектора?
7. Сформулюйте і запишіть граничні умови електростатики.
8. Як змінюються граничні умови електростатики, якщо одне із середовищ – ідеальний провідник?
9. В чому полягає сутність прямої та оберненої задач електростатики і магнітостатики?
10. Наведіть співвідношення для визначення характеристик електростатичного та магнітостатичного полів за відомими параметрами джерел.
11. За якими формулами можна визначити розподіл густини електричного заряду в певному об'ємі при відомих параметрах поля і середовища?
12. Яким чином можна замінити порядок інтегрування при розв'язуванні статичних задач?
13. Поясніть явище зміни напрямів силових ліній електричного та магнітного полів поблизу поверхні ідеального провідника.
14. Від чого та яким чином залежить енергія електричного поля конденсатора?
15. Чому індуктивність котушки не залежить від сили струму в ній?
16. Назвіть характеристики звукового поля.

## 5. ЕКРАНУВАННЯ ПОЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ПРИРОДИ

### Глибина проникнення ЕМХ у метали; екранування засобів та об'єктів

Функціонування технічних систем обробки, зберігання та передачі інформації з об'єктивних причин супроводжується наявністю побічних електромагнітних випромінювань і наведень, які є причиною виникнення електричних, електромагнітних і параметричних каналів витоку інформації. Тому на захищених об'єктах інформатизації повинна приділятися велика увага до зниження рівня побічних електромагнітних випромінювань і наводок.

Радикальним способом усунення побічних електромагнітних випромінювань і наведень є екранування, яке дозволяє виключити наведення в сполучних лініях і обмежити сферу дії побічних електричних, магнітних і електромагнітних полів, що створюються у безпосередній близькості від джерел випромінювання. У цьому параграфі розглядаються фізичні основи екранування полів, розкриті принципи і механізми екранування електричних, магнітних і електромагнітних полів, представлені моделі типових екранів.

### Основи екранування полів

Екранування - локалізація електромагнітної енергії в певному просторі за рахунок обмеження поширення її всіма можливими способами.

Між двома електричними ланцюгами, що знаходяться на певній відстані один від одного, можуть виникнути такі види зв'язків:

- через електричне поле;
- через магнітне поле;
- через електромагнітне поле;
- через дроти, що сполучають ці ланцюги.

Повне екранування може бути отримано тільки завдяки придушенням всіх 4 видів електромагнітних зв'язків. Однак вимоги до ефективності екранування в ряді конкретних випадків можуть бути знижені, що зужує завдання екранування до послаблення того чи іншого виду зв'язку.

Відомо, що напруженості електричних і магнітних полів у вільному просторі обернено пропорційні квадрату відстані від джерела, що збуджує поле. Напруженість електромагнітного поля обернено пропорційна першому степеню відстані. Напруга на кінці провідної або хвильової лінії з відстанню спадає повільно. Отже, при малих відстанях діють всі чотири види зв'язків. При подальшому збільшенні відстані спочатку зникає зв'язок через електричне і магнітне поля, потім перестає впливати електромагнітне поле і на дуже великій відстані впливає тільки зв'язок по дротах і хвилеводах.

Залежно від призначення розрізняють такі види екранів:

- з внутрішнім збудженням поля, в яких зазвичай знаходиться джерело

побічного випромінювання;

- екрани зовнішнього поля, у внутрішній порожнині яких знаходяться чутливі до цих полів пристрої.

У першому випадку екран призначений для локалізації поля в певному об'ємі, у другому - для захисту від впливу зовнішніх полів. Екран, захищаючи ланцюги, деталі, коливальні контури від впливу зовнішніх полів, здійснює суттєвий вплив на параметри екранованих елементів. В зв'язку з перерозподілом електромагнітного поля всередині екрану відбуваються зміни їх первинних параметрів, внаслідок чого, наприклад, змінюються магнітні зв'язки, зменшується первинна індуктивність котушок, збільшується ємність контурів, зростає активний опір, що призводить до зміни частоти. Відносні зміни параметрів екранованих елементів можна характеризувати за допомогою коефіцієнта екранування:

$$K_{\text{э}ij} = \frac{A_{\text{э}ij}}{A_{0ij}}$$

де  $A_{\text{э}ij}$  .. - значення  $i$ -го параметра  $j$ -го екранованого елемента при наявності екрану,  $A_{0ij}$  .. - без екрану.

Задавши припустимі межі змін параметрів та знаючи розміри екранованих елементів, можна визначити габаритні розміри екрану, матеріал, з якого він повинен бути виготовлений, і умови розміщення елементів всередині нього.

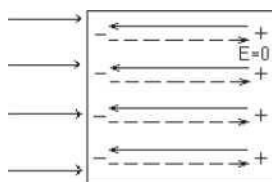
### **Екранування електричних полів**

Розрізняють екранування електростатичних і динамічних (змінних) електричних полів.

Електростатичне екранування ґрунтується на властивості провідників екранувати зовнішні поля, тобто не пропускати їх всередину області, оточеної провідником. Розглянемо це явище докладніше.

Встановлено, що якщо в електричне поле внести провідник, то в результаті поляризації електрони в ньому почнуть переміщатися в бік позитивно зарядженої пластини і на частині провідника, наближеної до цієї пластини, виникає негативний потенціал, протилежна частина поверхні провідника при цьому виявиться зарядженою позитивно (див. рис. 22).

+



*Рис. 22. Провідник в зовнішньому електричному полі*

Позитивна і негативна частини провідника створюють своє власне вторинне

поле, яке чисельно дорівнює зовнішньому і має напрям, протилежний до нього, отже зовнішнє поле і поле, створене провідником, компенсують одне одного у всіх точках всередині тіла провідника. Цим і пояснюється розподіл зарядів тільки на поверхні провідника. Всередині провідника поле відсутнє. Так спрощено виглядає один із прикладів явища електростатичної індукції. Цим явищем користується для здійснення електростатичного екранування. Оскільки всередині металевого тіла поле дорівнює нулю, то досить помістити в його внутрішню порожнину пристрій, схильний до впливу електростатичного поля і тим самим виключити вплив поля на цей пристрій. В цьому випадку ефективність екранування виявляється незалежною від форми екрану, товщини його стінок, та від металу, з якого він виготовлений. Ефективність буде залежати тільки від заземлення екрана.

Продемонструємо викладене. Для цього помістимо заряд  $+q$  в центрі сферичної металеві оболонки (рис. 23 а).

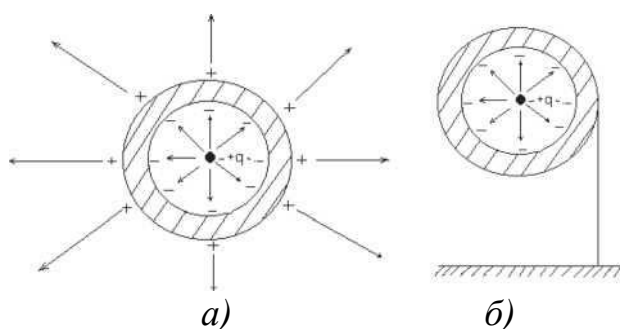


Рис. 23. Заряд в центрі металеві оболонки: а) без заземлення, б) з заземленням

На внутрішній поверхні оболонки виникають заряди  $-q$ , а на зовнішній  $+q$ , отже екран виявляється неефективним. Однак якщо тепер підключити металеву оболонку до землі (до корпусу) (рис. 3.29, б), то це призведе до того, що заряди, що знаходяться на зовнішній поверхні оболонки, перейдуть на корпус, т. К. Він має дуже велику ємність, внаслідок чого поза оболонкою (екраном) поле виявиться рівним нулю.

Таким чином, електростатичне екранування зводиться до замикання електростатичного поля на поверхню металевого екрана і відведення електричних зарядів на землю (на корпус пристрою). Таким чином, заземлення електростатичного екрана є необхідним елементом, що впливає з фізичного змісту електростатичного екранування. Без заземлення електростатичний екран майже повністю втрачає свою ефективність.

Слід звернути на те, що при наявності зарядів як на внутрішній, так і зовнішній поверхнях екрану поле всередині екрану визначається тільки внутрішніми зарядами і абсолютно не залежить від зовнішніх. Однак зворотне твердження є неправильним, оскільки заряди, що знаходяться всередині екрану, створюють поле і поза екраном. Фізично цей вплив зумовлений



появою на зовнішній поверхні екрану індукованих зарядів, вплив яких може бути нейтралізовано відведенням їх в землю. Отже, за допомогою заземлення електростатичного екрану можна досягти взаємного екранування як внутрішнього простору екрану від зовнішнього поля, так і зовнішнього простору від внутрішнього поля.

Якщо металевий екран повністю компенсує вплив електростатичного поля, то використання діелектричних екранів може послабити поле в  $\epsilon_r$  разів, де  $\epsilon_r$  - відносна діелектрична проникність матеріалу, оскільки від поля вільних зарядів віднімається поле поляризаційно-зв'язаних зарядів.

Помістимо в поле двох паралельних металевих пластин діелектрик. Під впливом сил електростатичного поля діелектрик поляризується: нейтральні в електричному відношенні молекули діелектрика перетворюються в електричні диполі, а диполі, вже наявні в діелектрику, повертаються осями в напрямку дії сил поля, утворюючи на бічних поверхнях електричні заряди. При цьому на одній стороні діелектрика утворюється негативний поверхневий заряд, а на другий - позитивний.

Ці зв'язані електричні заряди діелектрика створюють в ньому власне поле, напрямлене протилежно до зовнішнього, що призводить до зменшення результуючого електростатичного поля в діелектрику. Чим більша діелектрична проникність, тим більшою є величина зв'язаних електричних зарядів і тим менше в ньому результуюче електростатичне поле. Отже, пристрій, на який впливає електростатичне поле, доцільно розміщувати в самому діелектрику, наприклад в спирті ( $\epsilon_r = 26$ ), в трансформаторному маслі ( $\epsilon_r = 22$ ), дистильованій воді ( $\epsilon_r = 81$ ), а при використанні твердих діелектриків, цей діелектрик повинен щільно прилягати до пристрою.

Розглянемо джерело зі змінною ЕРС. Тоді заряди на тілі А (рис. 24) будуть змінюватися, а, отже, будуть змінюватися і заряди, розподілені на внутрішній поверхні екрану, які в кожен момент часу матимуть полярність, яка компенсуватиме поле тіла А.

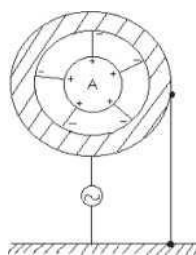


Рис. 24. Тіло А зі змінними зарядами всередині металевого екрану

В результаті цих змін на поверхні екрану протікатиме змінний струм. Компенсація поля за допомогою заземлення в цьому випадку не може бути повною, оскільки внаслідок появи струму в стінках екрану на них з'являється напруга. Тому ефективність екранування змінного електричного поля в даному випадку буде залежати як від товщини стінок, так і від провідності

матеріалу екрану. Зі збільшенням товщини і провідності матеріалу екрану залишкове поле за межами екрану зменшиться внаслідок зменшення падіння напруги на його стінках, одночасного зросте ефективність екранування.

Екранування електричних змінних полів по суті є завданням усунення паразитних ємнісних зв'язків. На рис. 25, а) показано вплив позитивного заряду елемента А на елемент Б внаслідок наявності взаємної ємності зв'язку

$C_{AB}$ . Поставимо між тілами А і Б металевий екран В радіусом  $r$  (див. рис. 25)

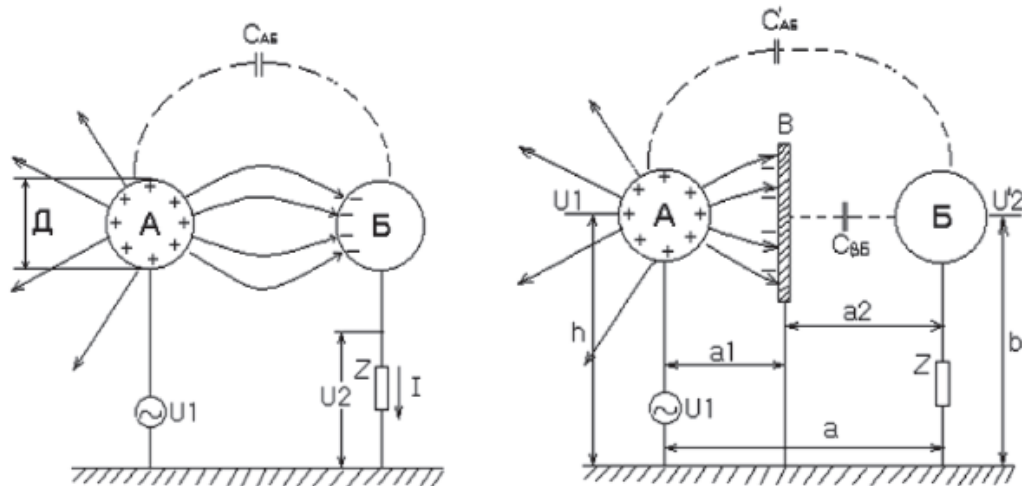


Рис. 25. Схема впливу тіла А на тіло Б через паразитну ємність: а) без екрану, б) з екраном В

Екран В буде «перехоплювати» частину електричних силових ліній, захищаючи тим самим тіло Б від електричного поля тіла А.

У цьому випадку маємо свого роду ємнісний дільник.

Ефектність екранування плоского екрану радіусом  $r$  можна оцінити за формулою

$$K = \frac{U'_2}{U'_1} = \frac{C_{AB}}{C'_{AB}} \approx \frac{5 \cdot r}{a \cdot a_1 \cdot a_2}$$

де  $a$  - відстань між тілами А і Б,  $a_1$  - відстань від тіла А до екрану В,  $a_2$  - відстань від екрану В до тіла Б.

Ефективність екранування в даному випадку визначається головним чином можливостями проникнення поля перешкод за екран в результаті дифракції розсіювання. Ці явища будуть найбільш відчутні, якщо  $a_1 = a_2$ . Для підвищення ефективності екранування необхідно виконати одну з умов  $a_1 > a_2$  або  $a_2 > a_1$ , вибір якого визначається призначенням екрану і тим, що екранується - об'єкт або джерело випромінювання.

Послаблення зв'язку між тілами А і Б залежить від природного згасання хвилі електричного поля за рахунок рознесення тіл, тобто  $U_2/U_1$ . Тому загальне згасання поля характеризується коефіцієнтом зв'язку

$$k_{зв} = \frac{U_2}{U_1 \cdot \mathcal{E}_0} = 0,4 \frac{h \cdot b \cdot a_1 \cdot a_2}{a \cdot r^3 \cdot \ln\left(\frac{4h}{D}\right)}$$

де  $D$  - діаметр тіла А;  $h$  і  $b$  - відстань відповідно від тіл А і Б до заземлювальної поверхні.

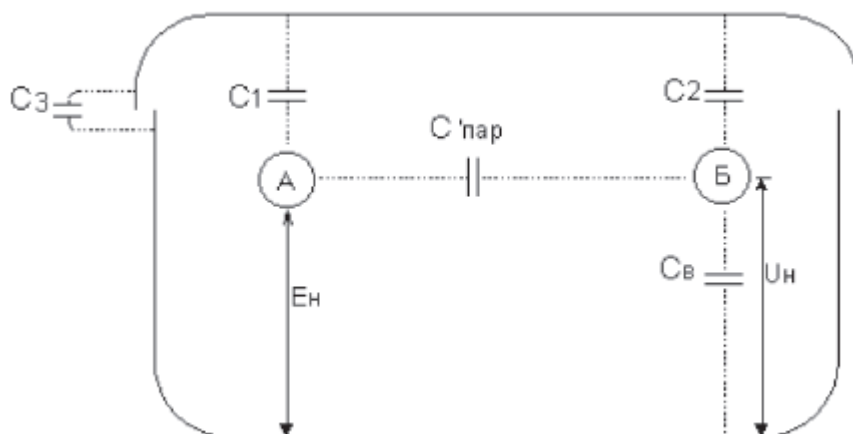
Чим менше значення  $k_{зв}$ , тим менше взаємний вплив елементів і тим більше їх розв'язка. Екрануючий ефект заземленого металевого листа полягає в шунтуванні на корпус більшої частини паразитної ємності, що знаходиться між джерелом і приймачем наведень.

Узагальнюючи все вищесказане, можна сформулювати способи зменшення ємнісного зв'язку між тілами (елементами) А і Б.

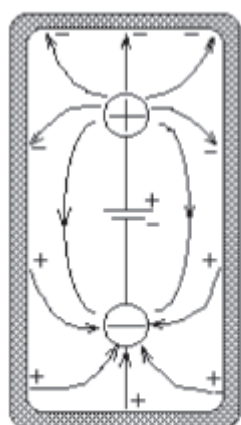
- 1) Відокремлювати на максимальну відстань елементи А і Б.
- 2) Міняти орієнтацію елементів так, щоб наведення компенсувалися.
- 3) Використовувати в конструкції мініатюрні радіоелементи.
- 4) При недостатності всіх цих заходів, між елементами встановлювати екран для екранування електричного поля.

Важливою умовою використання електростатичного екрану є його заземлення (з'єднання з корпусом). При цьому застосування провідників, що з'єднують екран з корпусом, є неприпустимим. Екран - це не тільки перегородка між елементами. У деяких випадках таким екраном може служити кришка корпусу, в якому розташовуються ці елементи (рис.26 а). Якщо  $C_3 = 0$ , тобто кришка щільно притиснута до корпусу, то  $C_1$  і  $C_2$  не будуть пов'язувати елементи А і Б. Зв'язок між ними буде здійснюватися тільки через ємність  $C_{пар}$ , величина якої набагато менша цієї ємності без кришки.

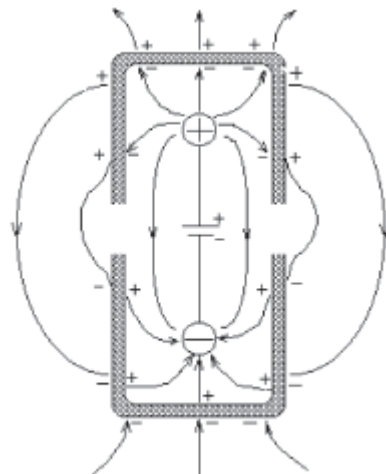
Екранування електричного диполя. Вклавши його в екран, отримаємо повністю екрановане зовнішній простір, для якого напруженість електричного поля  $E$  дорівнює нулю (рис. 26,б). Для пояснення процесу екранування розглянемо рис. 26,в, на якому представлено екранування поля диполя металевою оболонкою, що складається з двох частин. До стикання обох частин екрану, на кожній з них існують індивідуальні заряди того ж знаку, що і заряди відповідних половин диполя.



а)



б)



в)

Рис. 26.Екранування поля диполя:

а) екранування кришкою; б) суцільним екраном; в) екраном, що складається з двох частин

Поза екраном буде існувати електричне поле таке ж за величиною, як при відсутності екрана. При стиканні частин екрану в його зовнішній поверхні виникне згасаючий коливальний процес, в результаті якого енергія поля перейде в інші види. Тому поза екраном  $E = 0$ .

## 6. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

Світ який нас оточує, повен об'єктів ,що рухаються. Цей рух у самому загальному випадку можна поділити на два класи в залежності від того, чи залишається об'єкт поблизу певного середнього положення чи такого положення немає. Приклади руху першого класу – це вібрація, струм, коливання маятника, поршня, рух електронів в атомах і багато інших. Приклади руху другого класу – це ковзання шайби по льоду, пучок електронів в телевізійній трубці, рух імпульсів по довгому тросу при смиканні за кінець троса, морські хвилі та інше.

### 1. Коливання та їх класифікація.

Іноді один і той же рух можна віднести до будь-якого з цих класів: так хвилі океану рухаються до берега, але вода рухається ввєрх і вниз, а також вперед і назад навколо певного середнього положення. І таких явищ в навколишньому середовищі дуже і дуже багато.

Коливаннями називають обмежені рухи навколо певного середнього положення. А хвиля – це поширення коливань у просторі. Ось чому коливання називають джерелом хвиль. Тому вивчення поширення хвиль та хвильових полів починається з розгляду коливань.

Коливання – це рух, що здійснюється матеріальним тілом або частинкою навколо певного середнього положення, яке називають положенням рівноваги. При цьому рух складних систем, які мають багато елементів, що рухаються, може бути представлений суперпозицією більш простих рухів, які відбуваються одночасно і які називають модами (гармоніками).

Будь-яка система, що здійснює коливання, описується певною фізичною величиною, відхилення якої від положення рівноваги залежить від координат і часу. Для механічних систем це зміщення маси в точці з координатами  $x, y, z$  від положення рівноваги. Таке зміщення описується вектором  $\vec{\Psi}(x, y, z, t)$ , який часто називають хвильовою функцією.

Для електричних систем такою величиною є електричний струм в котушці або заряд на обкладинках конденсатора. В тих випадках, коли ці величини породжують електричне поле  $\vec{E}(x, y, z, t)$  або магнітне поле  $\vec{B}(x, y, z, t)$ , говоримо про електромагнітні хвилі.

Якщо матеріальне тіло, на яке діють сили, знаходиться в положенні рівноваги, то потенціальна енергія його мінімальна – система знаходиться в потенціальній ямі (рис.27).

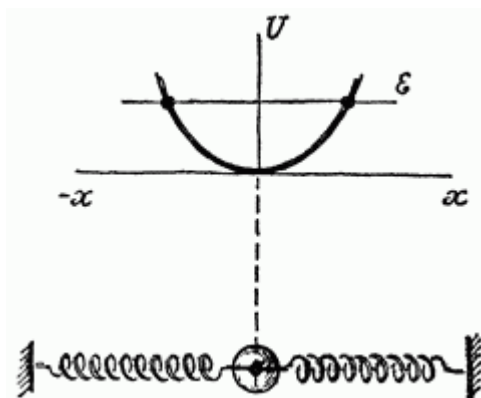


Рис. 27.

Хід потенціальних кривих поблизу положення рівноваги завжди може бути представлено параболічною залежністю, тобто у вигляді  $U = \frac{1}{2} kx^2$ . Це ґрунтується на тому, що потенціальна енергія є функцією зміщення від положення рівноваги, а будь-яку функцію при малих  $x$  можна розкласти в ряд Тейлора

$$U = ax + \frac{1}{2} kx^2 + bx^3 + cx^4 + \dots = \frac{1}{2} kx^2,$$

що вірно при малих  $x$  і при симетричній потенціальній ямі («пропадає»  $ax$ ).

Сила, що діє на тіло, яке відхилилося від положення рівноваги визначається похідною від потенціальної енергії з протилежним знаком, оскільки ця сила повертає тіло до положення рівноваги, тобто завжди протилежна зміщенню:

$$F = -\left(\frac{dU}{dx}\right) = -\left(\frac{d\frac{1}{2}kx^2}{dx}\right) = -kx$$

Цю силу називають повертаючою силою, а  $k$  – коефіцієнтом повертаючої сили.

Характер руху під дією цієї сили визначає закон Ньютона (для механічних систем), який для малих зміщень має вигляд:

$$F = ma = -kx$$

Це рівняння буде виконуватися, якщо тіло здійснює біля положення рівноваги гармонічні коливання, тобто коливання за законом

$$x = A \cos \frac{2\pi}{T} t = A \cos \omega t$$

Де  $A$  – амплітуда,  $\omega$  – кутова частота,  $T$  – період,  $\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$  – частота,  $\varphi$

- фаза коливань.

Дійсно, ми можемо записати:

$$V = \frac{dx}{dt} = -\frac{2\pi A}{T} \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$\text{Звідси: } V_{\max} = \frac{2\pi A}{T} \text{ і}$$

$$a = \frac{dV}{dt} = -\frac{4\pi^2}{T^2} A \cos \frac{2\pi}{T} t$$

Якщо підставити одержані значення, то отримаємо:

$$-m \frac{4\pi^2}{T^2} A \cos \frac{2\pi}{T} t = -kA \cos \frac{2\pi}{T} t$$

Видно, що множники, які містять час, скорочуються. Отже, рівняння гармонічного коливання задовольняє закон Ньютона для малих відхилень від рівноваги.

Важливо, що закон Ньютона накладає зв'язок на період можливих коливань

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Тобто період визначається коефіцієнтом повертаючої сили ( $k$ ) і масою.

Колівання виникають під дією зовнішніх сил, а їх властивості визначаються такими властивостями фізичних систем, як повертаюча сила і інерція. Повертаюча сила намагається повернути елемент, що рухається, в положення рівноваги. Так у випадку LC-кола повертаюча сила виникає внаслідок існування сил відштовхування між електронами, яке перешкоджає їх накопичуванню на одній із обкладинок конденсатора. Інерція системи протидіє будь-якій зміні в стані системи. Так інерція LC-кола визначається індуктивністю  $L$ , яка перешкоджає зміні величини струму.

Якщо за рахунок зовнішньої сили виникає додатне зміщення  $\Psi$  (при цьому  $\frac{d\Psi}{dt} = 0$ ), то повертаюча сила створює прискорення, яке викликає появу швидкості, протилежної за знаком зміщенню. Від'ємна швидкість досягає максимуму в момент повернення  $\Psi$  в положення рівноваги  $\Psi = 0$ . При цьому повертаюча сила стане рівною нулю, а від'ємна швидкість викличе появу від'ємного зміщення. Повертаюча сила стане від'ємною, але тепер вона повинна подолати інерцію, яка зумовлена від'ємною швидкістю. Нарешті швидкість стане рівною нулю, а зміщення максимальним і від'ємним.

У відповідності з тим, що в механіці оперують двома видами потенціальної енергії – пружної й тяжіння, і механічні коливання розділяють на два випадки:

- 1) коливання під дією тяжіння – коливання маятників (має велике значення в гравіметричних приладах);
- 2) пружні коливання – лінійні коливання стиску і розтягнення, поперечні коливання зсуву (у твердих середовищах), крутильні коливання (сейсмічна, сейсмо-, гідро-, акустична розвідки).

Врахуємо також коливання електричних зарядів і магнітних диполів – які визначають електромагнітні коливання і є основою РЕР, ОЕР, ОР.

В ядерній фізиці досліджують і хвильові властивості елементарних часток.

Для елементарних коливань “маса” має умовний зміст і є характеристикою інерції системи.

Таким чином, першим критерієм для класифікації коливань буде характер повторення фізичних величин, що описують коливання.

За цим критерієм розрізняють **періодичні і неперіодичні** коливання. Простіші періодичні коливання – це гармонічні коливання.

В реальних коливальних системах існує зовнішній опір (тертя і т. ін.), тому коливання поступово згасають.

Наступним критерієм класифікації коливань є їх розподіл на **вільні** (в тому числі і згасаючі) та **вимушені**.

В залежності від кількості параметрів, що описують положення системи, що здійснює коливання, розрізняють **коливальні системи з одним ступенем свободи, з двома, трьома і т. д. ступенями свободи**.

Приклади системи з одним ступенем свободи: маятник, що здійснює коливання в заданій площині, маса, яка пов'язана з пружиною, LC-коло і т. ін. Система з двома ступенями свободи: подвійний маятник, два маятника, що пов'язані пружиною, горизонтальна нитка з двома масами, зв'язані LC-конттури.

Крім того розрізняють **поздовжні, поперечні і змішані коливання** (і хвилі).

Нарешті відмітимо, що в теорії коливань велику роль відіграють як лінійні процеси, так і нелінійні.

Нелінійні процеси виникають тоді, коли зміщення не дуже малі порівняно з положенням рівноваги.

## 2. Хвилі, їх джерела і характеристики.

**Хвилями** називаються збурення стану речовини або поля, які поширюються у даній речовині або полі.

Механічні збурення (*деформації*), які поширюються у пружних середовищах, називають **пружними хвилями**. Зовнішні тіла, які викликають ці збурення, називають джерелами хвиль. Поширення пружних хвиль відбувається шляхом збурення коливань все більш і більш віддалених від джерела частинок середовища. Важливіша відмінність пружних хвиль в середовищі від будь-якого іншого впорядкованого руху його частинок полягає в тому, що при малих збуреннях (*лінійне наближення*) поширення хвиль не пов'язано з переносом речовини. Пружні хвилі поділяють на звукові (*акустичні*), ударні (*нелінійні*) та поверхневі.

Електромагнітні збурення (*напруженості електричного і магнітних полів*), що поширюються в просторі називають **електромагнітними хвилями** (*ЕМХ*).

Якщо виділити напрям, в якому передається механічна енергія, а потім розкласти його за трьома взаємно перпендикулярними осями, одна з яких лежить вздовж лінії поширення, а дві інших в перпендикулярній площині, то в загальному випадку хвилі можна розглядати як сукупність трьох рухів: двох поперечних і одного поздовжнього.



Відповідно розрізняють **поперечні, поздовжні і змішані** хвилі. Поперечні пружні хвилі виникають тільки в твердих тілах. В залежності від розмірності простору, в якому поширюються, хвилі розрізняють:

**біжучі хвилі в одновірному просторі** (*струна, лінії передачі, поздовжні хвилі в пружинах, поздовжні звукові хвилі в трубі і т. ін.*);

**біжучі хвилі в двовірному просторі** (*прямі хвилі у воді*);

**біжучі хвилі в тривірному просторі** (*ЕМХ, звукові хвилі у вільному просторі і т. ін.*). Швидкість поширення хвиль визначається механічними або електромагнітними властивостями середовища.

Для виникнення хвиль у середовищі необхідно створити джерело коливань. Нехай джерело коливань забезпечує в початку відліку коливання типу  $y = A \cos \omega t$ . У точці, яка віддалена від початку відліку на величину  $X$ , коливання почнеться не миттєво, а з запізненням на час  $\tau = \frac{x}{c}$  який потрібен

для поширення збурення на цю відстань. Тому рівняння коливань точки, яка знаходиться на відстані  $X$  від початку координат, буде мати вигляд  $y = A \cos \omega(t - \frac{x}{c})$ . Це і буде рівняння хвилі. Для гармонічних біжучих хвиль швидкість їх поширення  $C$  називають також фазовою швидкістю  $C = V_\phi$ . Якщо

рівняння записати у вигляді:  $y = A \cos(\omega t - \frac{\omega}{c} x) = A \cos(\omega t - kx)$ , то можна

використовувати поняття хвильового числа  $k$  і довжини хвилі  $\lambda$ :  $\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{V_\phi}$ ,

$$k = \frac{\omega}{V_\phi} = \frac{2\pi f}{V_\phi}, \quad V_\phi = \lambda f = \lambda \frac{1}{T}.$$

Якщо  $V_\phi(k) = \frac{\omega(k)}{k} = \text{Const}$ , то такі хвилі називають недиспергованими синусоїдальними хвилями. Диспергованими хвилями або хвилями з дисперсією називають синусоїдальні хвилі, для яких фазова швидкість  $V_\phi(k) = \frac{\omega(k)}{k} = V_{\text{gr}}$  залежить від довжини хвилі. Така хвиля являє собою суперпозицію біжучих хвиль з різними хвильовими числами. Тому вони поширюються з різними швидкостями і розходяться у просторі (*диспергують*).

Дисперговані ЕМХ (*наприклад в іоносфері*) можуть мати фазову швидкість, що перевищує швидкість світла в вакуумі.

Поверхня (*геометричне місце точок*), в кожній точці якої в заданий момент часу фаза хвиль має одне і теж значення, називається хвильовою поверхнею або фронтом хвилі. Різним значенням фази відповідає сімейство хвильових поверхонь. При поширенні короточасних збурень (*у тому числі ударних хвиль*) фронтом хвилі називається границя між збуреною і незбуреною областями середовища.

Рівняння сімейства хвильових поверхонь має вигляд  $\omega t - \phi_0 = c$ , де  $c$  – константа, яка грає роль параметра;

$\varphi_0$  – початкова фаза.

У випадку однорідного, ізотропного середовища швидкість кожної точки хвильової поверхні напрямлена по нормалі до поверхні і чисельно дорівнює швидкості хвилі  $C$ , яка називається фазовою швидкістю хвилі.

Якщо хвильові поверхні являють собою систему паралельних площин, то такі хвилі називають плоскими (*величини, що характеризують хвильовий рух, залежать тільки від часу і від однієї просторової координати*). Хвильові поверхні таких хвиль в однорідному ізотропному середовищі перпендикулярні до напрямку поширення хвилі (*напрямку переносу енергії*), який називається променем.

Рівняння плоских хвиль:

$$y = A \sin(\omega t - kx + \varphi_0) - \text{в напрямку збільшення } X$$

$$y = A \sin(\omega t + kx + \varphi_0) - \text{у зворотному напрямку.}$$

Якщо хвильовими поверхнями є система концентричних сфер, то хвилі називаються сферичними хвилями (*величини що характеризують хвильовий рух, залежать тільки від часу і відстані  $r$  від деякої точки простору, яка називається центром хвилі*). Сферичні хвилі збуджуються в однорідному ізотропному середовищі точковим джерелом хвиль.

Рівняння синусоїдальної сферичної хвилі, що розходитьсь

$$y = \frac{A_0}{r} \sin(\omega t - kR + \varphi_0)$$

Хвиля називається циліндричною, якщо її хвильові поверхні мають вигляд кругових циліндричних поверхонь з загальною віссю симетрії.

$$y = \frac{A_0}{\sqrt{R}} \sin(\omega t - kR + \alpha_0)$$

де  $R$ - відстань від осі.

Нарешті розглянемо випадок, коли дві плоскі хвилі (*для спрощення*), які мають однакові характеристики, поширюються назустріч одна одній. Тоді результуюча картина повинна відповідати виразу:

$$y = A \cos \omega(t - \frac{x}{c}) + A \cos \omega(t + \frac{x}{c}) = 2A \cos \frac{\omega x}{c} \cos \omega t = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t .$$

Ми одержали дуже цікавий результат. Сума двох біжучих хвиль не дає хвильового руху.

Формула вказує на наявність коливань ( $\cos \omega t$ ) з амплітудою  $2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$ .

Ця амплітуда в різних місцях простору є різною.

Цей своєрідний коливальний стан середовища, який виникає при накладанні двох біжучих хвиль, що поширюються в протилежних напрямках, називається стоячою хвилею. Підкреслимо, що стояча хвиля не є хвилею в загальному розумінні, оскільки у неї немає напрямку поширення, вона не переносить енергію. Ця назва характеризує коливальний стан середовища, як це і було визначено раніше при розгляді багатомірних коливань.

Цей коливальний стан має наступні особливості. По-перше, коливання здійснюють не всі точки середовища. Так, в місцях, які відповідають умовам

$x = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4 \dots$  амплітуда коливань дорівнює нулю. Ці точки носять назву вузлів стоячої хвилі ( $\lambda/2$ ).

Між двома вузлами лежать точки, які здійснюють коливання з найбільшою амплітудою, яка дорівнює  $2A$ . Ці точки називаються пучностями стоячої хвилі.

В цілому, стояча хвиля – важливий коливальний процес, який виникає в тілах обмежених розмірів.

Нарешті відмітимо ще одну обставину. Гармонічне коливання визначеної частоти і амплітуди не може нести ніякої інформації, оскільки кожний наступний цикл коливань є точною копією попереднього. Щоб передати інформацію, коливання треба промодулювати. Модуляція (*биття*) створює „гребні” хвилі (*місія максимальної амплітуди*), які називають хвильовими групами (*пакетами*) або ще „сигналами”. Швидкість поширення сигналу буде  $v_{гр} = d\omega/dk$ , а не  $v = \omega_{ср}/k_{ср}$ , як для фазової швидкості. Ця швидкість називається груповою швидкістю, вона може відрізнятись від фазової, але ніколи не може перевищувати швидкість світла  $c$ .

**Ударні хвилі** – це хвилі, які поширюються в середовищі вздовж поверхні, на якій відбувається „стрибкоподібне” підвищення тиску, що супроводжується зміною густини, температури та швидкості руху середовища. Ця площина називається поверхнею розриву або стрибком густини. Виникають при вибухах, землетрусах, подоланні звукового бар’єру, детонації тощо. Важлива обставина – швидкість ударної хвилі відносно нерухомого середовища більша за швидкість звуку в цьому середовищі. Використовуються в сейсмоакустиці землетрусів, ядерних та інших потужних вибухів, в спеціальній розвідці тощо.

Електромагнітні хвилі – це хвилі які поширюються в просторі за допомогою електромагнітного поля. Найбільш широко використовуються в інформаційних РТС. Прийняте ділення частотного діапазону ЕМХ та типові приклади застосування його частин наведені нижче.

### **3. Класифікація хвиль за фізичною природою, просторовими параметрами, поляризацією, діапазонами.**

Практичне використання у наш час мають такі основні види хвиль – пружні, електромагнітні та магнітогідродинамічні.

**Пружні хвилі** поділяються на ударні та звукові. Вони, як відомо, можуть поширюватись в твердих тілах, газах (*в т.ч. в плазмі*) і в рідинах. Загальні властивості цих речовин вивчають в таких розділах фізики як термодинаміка, атомна і ядерна фізика.

Питаннями поширення хвиль займаються такі науки: поширення:

ЗХ в Землі та твердих тілах – сейсмоакустика

УХ в Землі та твердих тілах – сейсміка

ЗХ в воді і інших рідинах – гідроакустика

УХ в воді і інших рідинах – гідродинаміка

ЗХ в повітрі і інших газах – акустика

УХ в повітрі і інших газах – аеродинаміка

**Звукові хвилі** – це поширення в пружних середовищах слабких збурень – тобто механічних коливань з малою амплітудою.

Звукові (акустичні) хвилі поділяються на наступні діапазони хвиль (Таблиця 1.):

інфразвук (<16 Гц), звук (чутний; 16...20000Гц), ультразвук (20кГц...10<sup>9</sup>Гц), гіперзвук (10<sup>9</sup>...10<sup>13</sup>Гц). Ці хвилі широко використовуються в акустиці, гідроакустиці, сейсмоакустиці, медицині (УЗІ), в молекулярній акустиці і багато ін.

Таблиця 1

Границя діапазону	Назва діапазону	
0...16 Гц ∞...26 м	<b>інфразвук</b> у повітрі у воді	наукові дослідження
16...2*10 <sup>4</sup> Гц 26...1,65 см	<b>чутний звук</b> у повітрі у воді у твердих речовинах	акустика (оповіщення, зв'язок) гідроакустика (пасивна) спеціальна акустика
2*10 <sup>4</sup> ...10 <sup>9</sup>	<b>ультразвук</b>  у повітрі  у воді у твердих речовинах	здійснення та прискорення технологічних процесів звуколокація (пасивна), сонари, спецакустика гідроакустика (пасивна і активна) дефектоскопія, виміри, дроблення, спецакустика
10 <sup>9</sup> ...10 <sup>13</sup> Гц	<b>гіперзвук</b> у повітрі у воді у твердих речовинах	

**Електромагнітні хвилі** це, як відомо, зміни ЕМП, що поширюються у просторі. ЕМХ займають смугу частот практично від нуля до  $3 \cdot 10^{22}$  і більше і умовно поділяються на діапазони за довжиною або (у відповідності до формули, яка пов'язує частоту з довжиною хвилі  $f = c/\lambda$ ) за частотами за декадним принципом. Це означає, що береться умовне початкове значення, наприклад 3 кГц і поетапно множиться на 10 або на 10<sup>-1</sup>. Відповідно при класифікації за довжиною хвилі 1м поетапно множиться на 10 або на 10<sup>-1</sup>. Розподіл за діапазонами ЕМХ представлено у Таблиці 2 .

Таблиця 2

Діапазон	Назва частот	Діапазон	Назва хвиль	Не рекомендовані (застарілі) назви
3...30 Гц		10 000... 100 000	Декамегаметрові	
30... 300 Гц	Наднизькі	1000... 10 000 км	Мегаметрові	
300 ... 3000 Гц	Інфранизькі	100 . 1000 км	Гектокілометрові	
3.. 30 кГц	Дуже низькі	10... 100 км	Міріаметрові	Наддовгі (НДХ)
30... 300 кГц	Низькі (НЧ)	1 .. 10 км	Кілометрові	Довгі (ДХ)
300. 3000 кГц	Середні (СЧ)	100.. 1000 м	Гектометрові	Середні (СХ)
3... 30 МГц	Високі (ВЧ)	10... 100 м	Декаметрові	Короткі (КХ)
30... 300 МГц	Дуже високі	1... 10 м	Метрові	
300... 3000 МГц	Ультрависокі	10.. 100 см	Дециметрові	
3. 30 ГГц	Надвисокі	1 ... 10 см	Сантиметрові	Ультракорткі
30 300 ГГц	Вкрай високі	1... 10 мм	Міліметрові	
300.. 3000 ГГц	Гіпервисокі	0,1 .. 1 мм	Дециміліметрові	Субміліметрові

Крім вищезазначеного існують і деякі інші види розподілів діапазонів. По-перше, слід відмітити, що весь діапазон нормується за міжнародними угодами (МККР), розбитий на дев'ять смуг (виключаючи нижню межу та враховуючи верхню):

1. 9...535 кГц
2. 535...1605 кГц
3. 1606,5...4000 кГц
4. 4000...29,7 МГц
5. 29,7...100 МГц
6. 100...470 МГц
7. 470...2450 МГц
8. 2450...10500 МГц
9. 10,5...40 ГГц

Всі ці смуги суворо розподілено між різними службами, застосуваннями хвиль і таке інше.

По-друге (див Додатки) існує розподіл діапазонів, який використовується у військовій РЕА США: це діапазони А, В, С, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M.

**Магнітогідродинамічні хвилі** виникають при взаємодії електромагнітних, гідродинамічних та аеродинамічних явищ. Малі порушення стаціонарного руху середовища поширюються в ньому у вигляді магнітогідродинамічних хвиль, серед яких виділимо магнітозвукові хвилі. Ці хвилі відрізняються тим,

що вони бувають або прискореними, або сповільненими в порівнянні зі звуковою хвилею.

Магнітодинамічними називають також хвилі, які виникають в плазмі, окремо в іоносфері Землі при механічній дії на неї (*наприклад при старті БР*).

Окремого розподілу на діапазони такі хвилі не мають, для них використовують розподіл звукових хвиль.

### **Основні явища при поширенні хвиль.**

Явища, які мають місце при поширенні хвиль, є принципово важливим фактором впливу на радіоканал, який використовують для передачі інформації, та на канал можливого витоку інформації. До таких явищ належать:

- інтерференція;
- дифракція;
- рефракція;
- дисперсія;
- розсіювання;
- поглинання;
- відбивання;
- доплеровський зсув частоти.

### **Контрольні питання**

1. Коливання та їх класифікація.
2. Хвилі, їх джерела і характеристики.
3. Класифікація хвиль за фізичною природою, просторовими параметрами, поляризацією, діапазонами.
4. Випромінювання хвиль. Елементарні випромінювачі.
5. Основні явища при поширенні хвиль.

### **Завдання на СРС**

1. Поглиблене вивчення матеріалу заняття.
2. Коливання, їх характеристики та класифікація.

## 7. РІВНЯННЯ МАКСВЕЛА

### Струм зміщення та узагальнений струм. Узагальнений закон індукції Фарадея

Всі електромагнітні процеси, що відносяться до макроскопічної електродинаміки у нерухомих середовищах, підкоряються закономірностям, які були вперше сформульовані у 1873 Джеймсом Клерком Максвеллом.

Ці рівняння були отримані в результаті накопичених до того часу експериментальних даних і називаються рівняннями Максвелла.

Незважаючи на те, що з тих пір фізика просунулась далеко вперед, рівняння Максвелла і досі лежать в основі тих галузей науки та техніки, які пов'язані з практичним використанням електромагнітного поля.

### Узагальнений закон повного струму Ампера

На початку XIX століття датський фізик Ерстед експериментально встановив, що при пропусканні електричного струму по провіднику навколо нього виникає магнітне поле.

На підставі цих дослідів французький учений Ампер сформулював свій відомий закон повного струму.

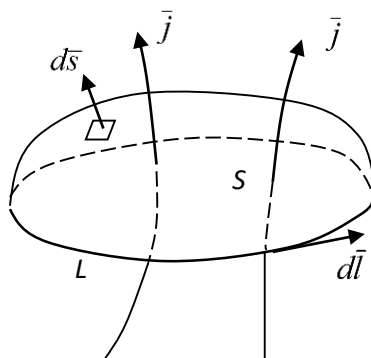


Рис. 28. Закон повного струму Ампера

Припустимо, що в середовищі розташовано замкнений контур  $L$ , елемент цього контуру позначимо  $d\vec{l}$ . На контур спирається гладка поверхня  $S$ . На поверхні показано елементарну площадку з орієнтацією вектора  $d\vec{s}$ .

Через поверхню  $S$  проходять струми провідності з густиною  $\vec{j}$ . Раніше вже було встановлено, що повний струм через поверхню  $S$  зв'язаний з густиною струму інтегральним рівнянням

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}. \quad (39)$$

Ампер сформулював свій закон так: циркуляція вектора напруженості магнітного поля  $\vec{H}$  по замкненому контуру  $L$  дорівнює повному струму, що пронизує цей контур:

$$\oint_L \bar{H} \cdot d\bar{l} = I.$$

Формула (39) є записом закону повного струму в інтегральній формі. Можливо закон записати також в диференціальній формі. Використовуючи формулу Стокса, отримуємо:

$$\oint_L \bar{H} \cdot d\bar{l} = \int_S \text{rot} \bar{H} \cdot d\bar{S}. \quad (40)$$

Тоді з рівнянь (1) та (2) одержуємо

$$\int_S \text{rot} \bar{H} \cdot d\bar{S} = \int_S \bar{j} \cdot d\bar{S}. \quad (41)$$

Контур  $L$  та поверхня  $S$  було обрано довільно. Тому з рівняння (41) слідує, що підінтегральні функції також повинні бути рівними:

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{j}. \quad (42)$$

Щоб уникнути парадоксу залежності вектора  $\bar{H}$  від положення поверхні  $S$  при незмінному контурі  $L$  в непровідних середовищах та змінних полях, Максвелл запропонував в правій частині цього рівняння, справедливого для струмів провідності та провідних середовищ, додати струм зміщення  $\bar{j}_{cm} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = \epsilon_a \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}$  (пам'ятаємо, що струм зміщення існує в непровідних середовищах та у випадку змінних в часі полів).

Таким чином, Максвелл узагальнив закон повного струму, додавши струм зміщення, та записав його у вигляді

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}. \quad (43)$$

Узагальнення, зроблене Максвеллом, полягає у тому, що Максвелл поширив закон повного струму Ампера на випадок провідних та непровідних середовищ та на випадок змінних полів. Він встановив зв'язок між електричним та магнітним полями: змінне в часі електричне поле викликає появу струмів зміщення, що спричиняє появу змінного в просторі магнітного поля.

### Закон електромагнітної індукції Фарадея

В 30-х роках XIX століття англійський фізик Фарадей досліджував взаємодію електричних струмів та магнітного поля. Він експериментально встановив, що при переміщенні постійного магніту всередині провідної котушки на кінцях провідника з'являється різниця потенціалів (електрична напруга)  $U$ . Так Фарадей відкрив свій закон електромагнітної індукції.

В середовищі розташуємо провідний контур  $L$ , елемент цього контуру позначимо  $d\bar{l}$ . На контур спирається гладка поверхня  $S$ , на якій знаходиться елементарна площадка  $d\bar{s}$ .

Через поверхню  $S$  проходять силові лінії вектору індукції магнітного поля  $\bar{B}$ .



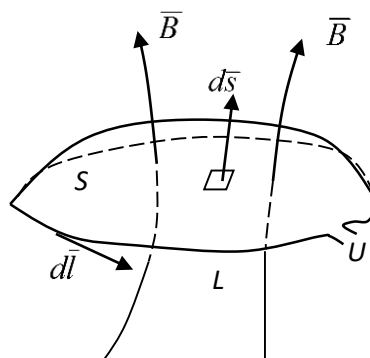


Рис. 29. Закон електромагнітної індукції

Закон електромагнітної індукції формулюється так: циркуляція вектора  $\bar{E}$  по контуру  $L$  дорівнює взятій з протилежним знаком швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi$ , що пронизує цей контур:

$$U = \oint_L \bar{E} \cdot d\bar{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \bar{B} \cdot d\bar{s}. \quad (44)$$

У цьому виразі було враховано, що магнітний потік  $\Phi = \int_S \bar{B} \cdot d\bar{s}$ .

На основі цього рівняння Максвелл сформулював своє друге рівняння в інтегральній формі:

$$\oint_L \bar{E} \cdot d\bar{l} = -\int_S \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot d\bar{s}. \quad (45)$$

Якщо використати формулу Стокса  $\oint_L \bar{E} \cdot d\bar{l} = \int_S \text{rot} \bar{E} \cdot d\bar{s}$ , та прирівняти підінтегральні вирази, то отримуємо друге рівняння Максвелла у диференціальній формі:

$$\text{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}. \quad (47)$$

Узагальнення, зроблене Максвеллом, полягає у тому, що Максвелл поширив закон електромагнітної індукції на всі (не обов'язково провідні) контури  $L$ .

### Рівняння Максвелла у диференціальній та інтегральній формах.

#### Рівняння Максвелла у диференціальній формі.

Система Основних Диференціальних Рівнянь (СОДР) включає в себе звичайно шість рівнянь, іноді до неї можуть додавати ще деякі рівняння. СОДР – це математичне формулювання основних закономірностей електромагнітного поля.

Перше та друге рівняння було розглянуто вище.

$$\text{Перше рівняння } \text{rot} \bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}. \quad (48)$$

$$\text{Друге рівняння } \text{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}. \quad (49)$$

Два наступних рівняння часто називають рівняннями для дивергенцій векторів  $\bar{D}$  та  $\bar{B}$ . Їх можливо отримати із першого та другого рівнянь СОДР, із закону збереження заряду у диференціальній формі, або із закону Гауса.

Спочатку отримаємо рівняння для закону збереження заряду у диференціальній формі.

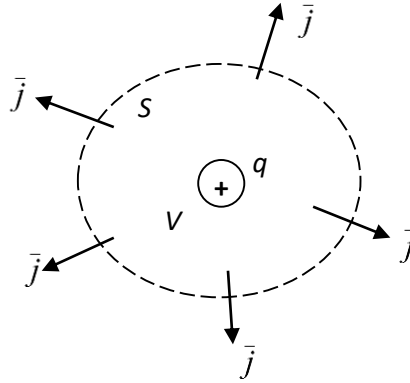


Рис. 30. Закон Гауса

Уявимо, що позитивний електричний заряд  $q$  знаходиться в об'ємі  $V$ . Проведемо навкруги нього замкнену поверхню  $S$ . Припустимо, що кількість заряду з часом зменшується, що супроводжується струмом

$$I = -\frac{\partial q}{\partial t}.$$

Знак "-" стоїть тому, що додатному напрямку струму відповідає зменшення заряду в об'ємі  $V$ .

Якщо використати зв'язок між кількістю заряду та його густиною  $q = \int_V \rho dV$ , отримаємо:

$$I = -\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV. \quad (50)$$

Далі використаємо відомий вираз для співвідношення струму через поверхню  $S$  та густиною струму в точках поверхні  $I = \int_S \bar{j} \cdot d\bar{S}$ .

За допомогою формули Остроградського – Гауса перетворимо цей вираз:

$$I = \int_S \bar{j} \cdot d\bar{S} = \int_V \text{div } \bar{j} \cdot dV. \quad (51)$$

Прирівняємо вирази (50) та (51):

$$\int_V \text{div } \bar{j} \cdot dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV,$$

де прирівняємо підінтегральні вирази та одержимо кінцеву формулу:

$$\text{div } \bar{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (52)$$

Це і є закон збереження заряду у диференціальній формі. Він має дуже простий фізичний зміст: розходження вектора густини електричного струму дорівнює швидкості зменшення густини електричного заряду в цій точці. Скористаємося цим законом для отримання формули дивергенції вектору  $\bar{D}$ .

В першому рівнянні Максвелла  $rot\bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial\bar{D}}{\partial t}$  візьмемо дивергенцію від правої та лівої частини:

$$div\ rot\bar{H} = div\left(\bar{j} + \frac{\partial\bar{D}}{\partial t}\right) = div\bar{j} + div\left(\frac{\partial\bar{D}}{\partial t}\right) \equiv 0.$$

Ми використали відому тотожність  $div\ rot\ \bar{a} \equiv 0$  для любого вектора  $\bar{a}$ .

$$\text{Звідси одержимо: } div\bar{j} + div\left(\frac{\partial\bar{D}}{\partial t}\right) = 0.$$

$$\text{Підставимо сюди вираз (13) та одержимо: } -\frac{\partial\rho}{\partial t} + div\left(\frac{\partial\bar{D}}{\partial t}\right) = 0,$$

$$\text{Змінимо місцями операції диференціювання по часу та простору:}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} div\bar{D} = \frac{\partial\rho}{\partial t},$$

$$\text{або } div\bar{D} = \rho. \quad (53)$$

Це рівняння часто називають третім рівнянням Максвелла або рівнянням для дивергенції вектора  $\bar{D}$ .

Рівняння для дивергенції вектора  $\bar{B}$  отримаємо із другого рівняння Максвелла  $rot\bar{E} = -\frac{\partial\bar{B}}{\partial t}$ , де візьмемо дивергенцію від правої та лівої частини:

$$div\ rot\ \bar{E} = div\left(-\frac{\partial\bar{B}}{\partial t}\right) \equiv 0,$$

$$\text{звідки } \frac{\partial}{\partial t} div\bar{B} = 0,$$

$$\text{або } div\bar{B} = const.$$

З фізичних міркувань зрозуміло, що магнітне поле не може існувати нескінченно довго, був час, коли поля не було. Таким чином одержуємо

$$div\bar{B} = 0. \quad (54)$$

Це четверте рівняння Максвелла - рівняння для дивергенції вектора  $\bar{B}$ . В СОДР часто включають закон збереження заряду:

$$div\bar{j} = -\frac{\partial\rho}{\partial t}. \quad (55)$$

До СОДР також часто включають матеріальні рівняння та закон Ома у диференціальній формі:

$$\bar{D} = \varepsilon_a \bar{E},$$

$$\bar{B} = \mu_a \bar{H},$$

$$\bar{j} = \sigma \bar{E}.$$

Що потрібно знати про СОДР Максвелла:

- всі величини електромагнітного поля, що входять до рівнянь, є функціями координат точки спостереження ( $x, y, z$ ) та часу  $t$ . Робимо припущення, що середовища нерухомі та параметри середовища в часі не змінюються:  $\varepsilon, \mu, \sigma = \text{const}$ ;

- рівняння СОДР неможливо вивести з інших, більш простих рівнянь. Вони являють собою узагальнення експериментальних законів електромагнітних явищ;

- це повна система рівнянь. В кожному конкретному випадку при завданих джерелах поля, параметрах середовищ, значеннях поля в початковий момент часу можливо знайти вектори поля в кожній точці простору та у будь-який момент часу;

- СОДР правильно відображає зв'язки між величинами, що входять до неї, в регулярних точках простору, тобто там, де параметри  $\varepsilon, \mu, \sigma$  змінюються неперервно (де можливо диференціювання по координатам простору) та не залежать від часу;

- шляхом розв'язання СОДР можливо встановити нові властивості електромагнітного поля. Із СОДР в окремих випадках отримують більш прості закономірності;

- рівняння СОДР – векторні. Кожне з них розкладається на кілька скалярних. Наприклад, в прямокутній системі координат перше рівняння  $\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  розкладається на три (для  $x$ -,  $y$ - та  $z$ -складових лівої та правої частини рівняння):

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = j_x + \frac{\partial D_x}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j_y + \frac{\partial D_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j_z + \frac{\partial D_z}{\partial t}; \end{cases}$$

- електричне та магнітне поля тісно пов'язані одне з іншим. Зміна одного поля в часі призводить до зміни другого в просторі. Їх незалежне існування можливе тільки в статиці;

- рівняння СОДР – лінійні. При їх розв'язанні можна використовувати принцип суперпозиції: поле від кількох джерел дорівнює сумі полів від кожного джерела.

### Рівняння Максвелла в інтегральній формі

Диференціальна форма	Інтегральна форма	Назва закону
$\text{rot} \bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$	$\oint_L \bar{H} \cdot d\bar{l} = I + I_{cm}$	Закон Ампера повного току
$\text{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$	$\oint_L \bar{E} \cdot d\bar{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$	Закон Фарадея електромагнітної індукції
$\text{div} \bar{D} = \rho$	$\oint_S \bar{D} \cdot d\bar{s} = \int_V \rho dV = q$	Закон Гауса
$\text{div} \bar{B} = 0$	$\oint_S \bar{B} \cdot d\bar{s} = 0$	Закон про відсутність магнітних зарядів
$\text{div} \bar{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$	$I = -\frac{\partial q}{\partial t}$	Закон збереження електричного заряду

Рівняння Максвелла в інтегральній формі мають більш простий фізичний зміст. Вони можуть застосовуватися в усіх точках, а не тільки в регулярних. Їх можливо застосовувати на границях розділу середовищ, в яких не існують похідні функції по координатах простору та не існують ротори і дивергенції векторів.

### Поняття про сторонні заряди та струми

Стороннім струмом називають струм провідності, який є джерелом електромагнітного поля, на відміну від струму провідності, що наводиться полем в середовищі та призводить до теплових втрат.

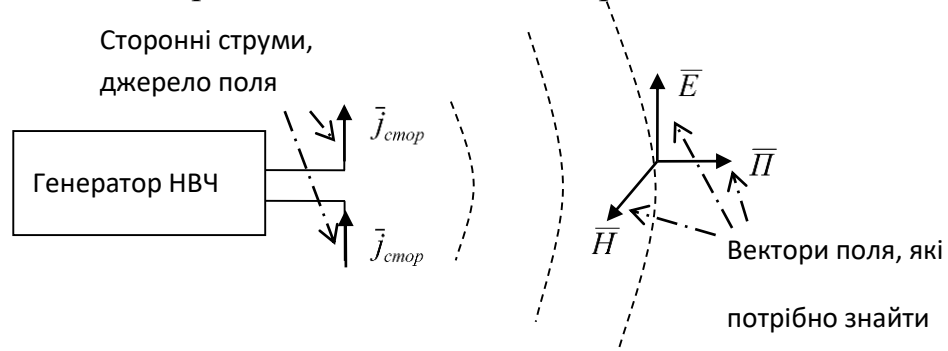


Рис. 31. Сторонні струми

Сторонні струми  $\bar{j}_{стор}$  та заряди  $\rho_{стор}$  повинні бути відомою функцією координат точки спостереження.

Сторонні струми вводяться в перше рівняння Максвелла:

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{j}_{стор}.$$

Сторонні заряди входять в рівняння для дивергенції вектора  $\bar{D}$ :

$$\text{div} \bar{D} = \rho + \rho_{стор}.$$

### Класичні граничні умови до рівнянь Максвелла

На практиці в області з електромагнітним полем може знаходитись кілька середовищ з різними електричними параметрами  $\varepsilon, \mu, \sigma$ .

Поверхня, що відокремлює середовище з одними значеннями параметрів  $\varepsilon, \mu, \sigma$  від іншого середовища, має назву межі поділу.

В точках на межі поділу не можна використовувати СОДР, тому що на межі всі вектори змінюються стрибком і похідні  $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$  не існують.

У цьому випадку користуються граничними умовами – це співвідношення, що зв'язують складові вектор поля по різні сторони від межі поділу на нескінченно близькій відстані один від одного.

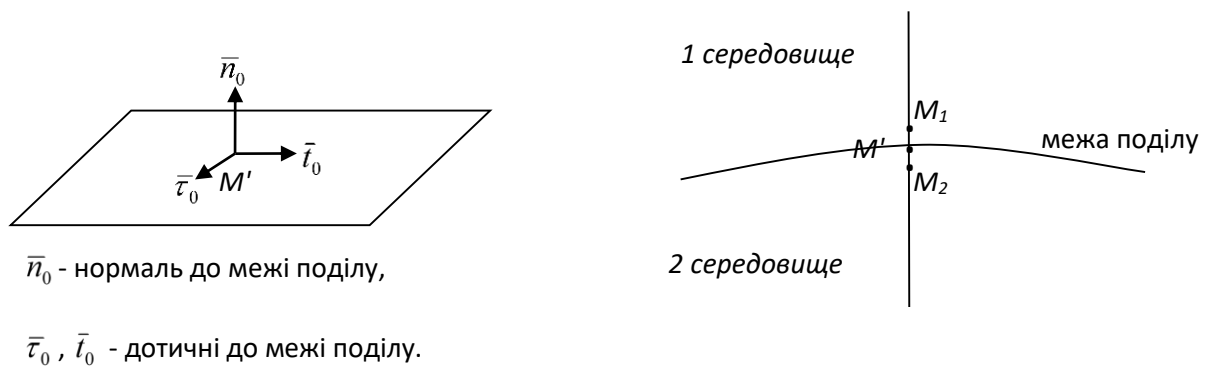


Рис. 32. Граничні умови

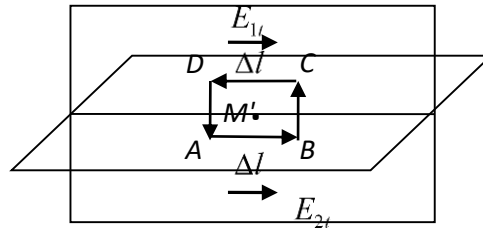
Розглянемо дотичні та нормальні складові векторів до межі поділу в точках  $M_1$  та  $M_2$ . Ці точки нескінченно близькі до точки  $M'$  на межі.

Вирази для дотичних та нормальних складові векторів отримують із першого та другого рівнянь Максвелла в інтегральній формі, тому що там немає похідних по координатах  $x, y$  та  $z$ .

Знайдемо граничні умови для дотичних складових вектора  $\vec{E}$ . Для цього скористуємося другим рівнянням Максвелла в інтегральній формі:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$

Побудуємо контур ABCD навколо точки  $M'$ , як показано на рисунку. Довжини відрізків АВ та CD однакові та дорівнюють  $\Delta l$ .

Рис. 33. Граничні умови для вектора  $\vec{E}$ 

Будемо зменшувати відрізки  $BC \rightarrow 0$  та  $DA \rightarrow 0$ . Площа контуру ABCD при цьому буде наближатись до нуля, тому потік вектора  $\vec{E}$  через контур ABCD також буде наближатись до нуля. Згідно з другим рівнянням Максвелла, циркуляція вектора  $\vec{E}$  по контуру ABCD також буде наближатись до нуля.

Знайдемо  $\oint_{L=ABCD} \vec{E} \cdot d\vec{l}$ . Добутки вектора  $\vec{E}$  на довжину відрізків  $BC \rightarrow 0$  та  $DA \rightarrow 0$  будуть близькі до нуля. Залишилися добутки:  $E_{2t} \cdot AB - E_{1t} \cdot CD \rightarrow 0$ . Знак "-" стоїть тому що напрям вектора  $\vec{E}_1$  та напрям обходу контуру в першому середовищі протилежні.

Врахувавши, що  $AB = CD$ , отримуємо першу граничну умову:

$$E_{2t} = E_{1t}. \quad (56)$$

Висновок: дотичні складові вектора  $\vec{E}$  при переході через межу поділу середовищ змінюються неперервно.

У випадку, коли друге середовище – ідеальний провідник, у ньому електричне поле відсутнє,  $E_{2t} = 0$ . Тому на межі з ідеальним провідником  $E_{1t} = 0$ . Це означає, що на межі з провідними матеріалами (наприклад, металами), вектор  $\vec{E}$  обов'язково перпендикулярний до поверхні.

Аналогічно із першого рівняння Максвелла в інтегральній формі отримуємо граничні умови для дотичних складових вектора  $\vec{H}$ :

$$H_{1t} - H_{2t} = j_{\text{нов.т}}. \quad (57)$$

У випадку, коли друге середовище – ідеальний провідник,  $H_{2t} = 0$ . Тому на межі з ідеальним провідником  $H_{1t} = j_{\text{нов.т}}$ . Це означає, що на межі з провідниками вектор  $\vec{H}$  має дотичну складову, рівну густині поверхневих струмів.

Значно рідше використовують граничні умови для нормальних складових дивергенцій векторів:

$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_{\text{нов}}, \quad (58)$$

$$B_{1n} - B_{2n} = 0. \quad (59)$$

## 8. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

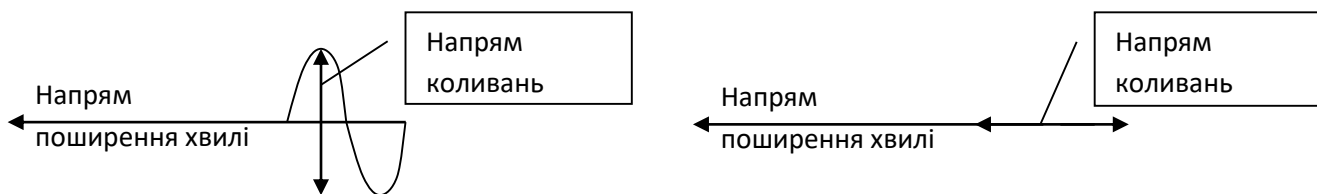
Хвилею називають коливання, що поширюються в просторі з часом.

У повітрі, в твердих тілах і всередині рідин механічні хвилі виникають завдяки силам пружності. Ці сили здійснюють зв'язок між окремими ділянками тіла. В утворенні хвиль на поверхні води грає роль сила тяжіння.

При поширенні хвилі відбувається переміщення певного стану середовища, що коливається, але не перенесення речовини. Коливання води, що виникли в одному місці, наприклад від кинутого каменя, передаються сусіднім ділянкам і поступово поширюються у всі сторони, залучаючи до коливального руху всі нові і нові частинки середовища. Перебіг же води не виникає: переміщається лише форма її поверхні.

Найважливішою характеристикою хвилі є її швидкість. Хвилі будь-якої природи не поширюються в просторі миттєво. Їх швидкість скінченна.

Якщо при поширенні хвилі окремі ділянки простору здійснюють коливання в напрямі, перпендикулярному напрямку поширення хвилі, то такі хвилі називаються *поперечними*. Наприклад, коливання шнура, закріпленого за один кінець - поперечні.



Поперечна хвиля

Подовжня хвиля

Рис. 34

Якщо окремі ділянки здійснюють коливання вздовж напрямку поширення хвилі, то така хвиля називається *подовжною*. Наприклад, коливання, що поширюються в пружині, - подовжні.

Основною властивістю всіх хвиль незалежно від їх природи є *перенесення ними енергії без перенесення речовини*.

Відстань між найближчими точками простору, що коливаються в однакових фазах, називається довжиною хвилі ( $\lambda$ ). Швидкість хвилі  $V = \frac{\lambda}{T}$ , де

$T$  - період хвилі  $T = \frac{1}{\nu}$ , де  $\nu$  - частота коливань. Тоді швидкість хвилі  $V = \lambda \nu$ .

### Електромагнітні хвилі

Експериментальні дослідження електромагнітних коливань в електричних колах показали, що зміни напруги і сили струму передаються від однієї ділянки до іншої з надзвичайно великою швидкістю - близько 300 000 км/с. Ця



швидкість у багато разів більше швидкості впорядкованого руху вільних електричних зарядів в провідниках.

Згідно до гіпотези Максвелла, процес зміни електромагнітного поля, що почався в деякій точці, буде далі безперервно захоплювати все нові і нові області навколишнього простору. Змінне електромагнітне поле, що поширюється, і є **електромагнітна хвиля**.

З теорії Максвелла випливає:

1. Існує особлива форма матерії - електромагнітне поле, що характеризується двома векторами: напруженістю  $\vec{E}$  і індукцією  $\vec{B}$ . В окремому випадку для незмінних (стаціонарних) полів є тільки електричне поле ( $\vec{B}=0, \vec{E}\neq 0$ ) або тільки магнітне поле ( $\vec{B}\neq 0, \vec{E}=0$ ). В загальному випадку змінного поля обидва вектори відмінні від нуля і змінюються синфазно.

2. У вільному просторі змінне електромагнітне поле поширюється у вигляді електромагнітної хвилі, в якій вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  перпендикулярні один одному і лежать в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі. Трійка векторів  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  і швидкість  $\vec{v}$  взаємно перпендикулярні. Таким чином, у вільному просторі електромагнітна хвиля є поперечною.

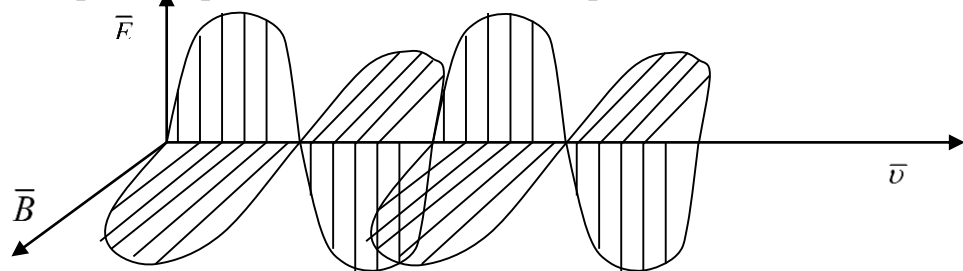


Рис.35

3. **Швидкість** поширення електромагнітної хвилі в речовині рівна:

$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}$ , де  $\epsilon$  і  $\mu$  - відповідно електрична і магнітна проникність речовини,

$\epsilon_0 = 8,854188 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\mu_0 = 1,2566271 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – електрична і магнітна сталі.

У вакуумі ( $\epsilon = \mu = 1$ ) швидкість електромагнітної хвилі

$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}..$

Швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі як фундаментальна величина

позначається буквою  $c$ :  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$  (**швидкість світла**).

У діелектрику ( $\mu \approx 1$ ) швидкість електромагнітної хвилі  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$ .

4. Густина енергії  $\omega_e = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2$  електричної складової електромагнітного поля і густина енергії  $\omega_m = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$  магнітної складової рівні між собою:  $\omega_e = \omega_m$  або

$$\frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

Звідси витікає:  $E^2 - v^2 B^2 = 0$ , а для вакууму  $E^2 - c^2 B^2 = 0$  (цей вираз є *інваріантом*, який не змінюється при переході від однієї системи відліку до іншої).

5. Світло є електромагнітною хвилею, і всі властивості електромагнітної хвилі характерні для нього.

Однією з важливих характеристик електромагнітної хвилі є поверхнева густина потоку випромінювання або *інтенсивність хвилі*. Вона дорівнює середній потужності випромінювання, що переноситься хвилею через поверхню одиничної площі:  $I = \frac{\Delta W_{cp}}{\Delta t S} = \frac{P_{cp}}{S}$  або  $I = \omega_{cp} c$ , де  $\omega_{cp}$  - середня густина енергії електромагнітної хвилі.  $[\omega_{cp}] = \text{Вт/м}^2$ .

### Властивості електромагнітних хвиль

**1. Основні властивості хвиль** будь-якої фізичної природи: необмежене поширення в однорідному середовищі.

**2. Відбивання і заломлення на межі розділу двох середовищ.** Явище відбивання хвиль полягає в тому, що на межі розділу двох середовищ з різними фізичними властивостями хвиля може частково або повністю відбитися від межі розділу і повернутися в перше середовище. Явище відбивання хвиль і інші закономірності поширення хвиль можна пояснити на основі принципу, сформульованого в 1690 р. Х. Гюйгенсом. Згідно *принципу Гюйгенса*, кожна точка поверхні, якої досягла в даний момент хвиля, стає точковим джерелом вторинних хвиль; огинаючи цих вторинних хвиль і визначає положення поверхні, якої досягає хвиля через деякий час.

Сукупність точок, до яких дійшов процес поширення хвилі, називається *хвильовою поверхнею* або *хвильовим фронтом*. Всі точки, що належать одній хвильовій поверхні, коливаються однаково, тобто синфазно. Знаючи форму хвильової поверхні в деякий момент часу  $t$ , можна знайти форму хвильової поверхні через проміжок часу  $\tau$ .

Якщо середовище однорідне, то від кожної точки хвильової поверхні поширюється вторинна сферична хвиля із швидкістю  $v$ . Хвильовий фронт у момент часу  $t_1 = t + \tau$  утворюють точки, віддалені від початкового фронту хвилі на відстань  $l = v\tau$  у напрямі прямої, перпендикулярної фронту хвилі. Лінія, перпендикулярна хвильовій поверхні, називається *променем*. Поширення хвиль відбувається у напрямі променя, який тим самим визначає напрям передачі енергії хвилею.

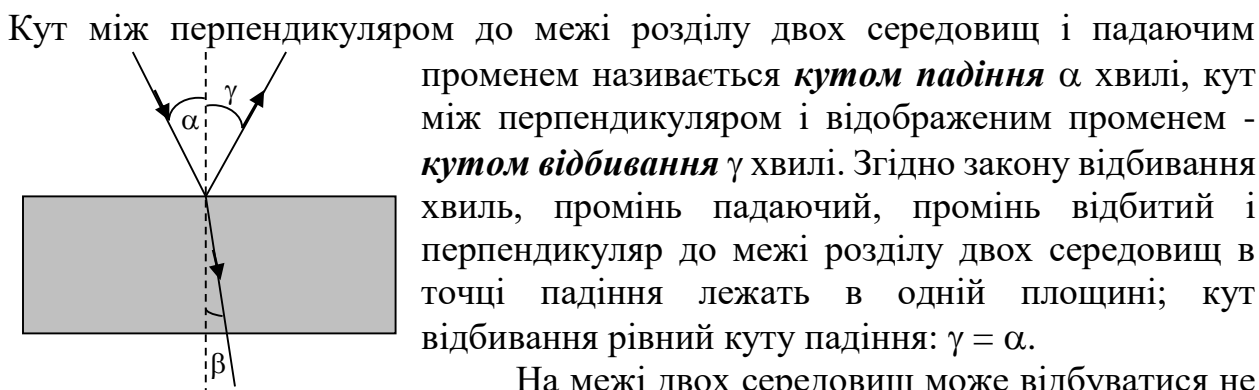


Рис.36

На межі двох середовищ може відбуватися не тільки відбивання хвиль, але проникнення їх в друге середовище із зміною швидкості поширення. Зміна напрямку поширення хвиль на межі розділу двох середовищ називається **заломленням хвиль**.

На підставі принципу Гюйгенса одержують **закон заломлення хвиль**: промінь падаючий  $\alpha$ , промінь заломлений  $\beta$  і перпендикуляр до межі розділу двох середовищ лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення не залежить від кута падіння і дорівнює відношенню швидкостей поширення хвиль в першому та другому середовищах.

Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення називається **відносним показником заломлення**: 
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2} = n_{21}.$$

Із закону заломлення витікає, що якщо швидкість поширення хвиль в другому середовищі менша, ніж в першому, то кут заломлення  $\beta$  менше кута падіння  $\alpha$  і заломлений промінь наближається до перпендикуляра. Якщо при деякому куті  $\alpha_0$  кут заломлення рівний  $90^\circ$ , то відбувається **повне внутрішнє відбивання**. При кутах падіння, більших граничного кута  $\alpha_0$ , хвиля за межі середовища не виходить. Якщо ж швидкість поширення хвиль в другому середовищі більша, ніж в першому, то кут заломлення більше кута падіння і заломлений промінь віддаляється від перпендикуляра.

**Абсолютним показником заломлення** називається відношення швидкості поширення електромагнітної хвилі у вакуумі до швидкості її поширення в даному середовищі: .

Абсолютний показник заломлення рівний відношенню синуса кута падіння променя з вакууму до синуса кута заломлення променя в речовині. Неважко переконатися, що відносний показник заломлення двох середовищ дорівнює відношенню їх абсолютних показників: .

**3. Інтерференція хвиль.** Поширення хвиль від одного джерела не чинить жодного впливу на поширення будь-якого числа хвиль від інших джерел. В кожній точці, якої досягають хвилі від різних джерел, відбувається накладання хвиль. **Принцип суперпозиції**: амплітуда коливань, викликаних дією декількох хвиль, у будь-який момент часу рівна векторній сумі амплітуд

кожної хвилі окремо. В результаті суперпозиції в одних точках простору коливання посилюються, а в інших послаблюються.

Явище збільшення або зменшення амплітуди результуючої хвилі при додаванні двох або декількох хвиль з однаковими частотами (періодами) коливань називається *інтерференцією хвиль*. При інтерференції амплітуда результуючих коливань в різних точках простору має різні значення, а розташування в просторі максимумів і мінімумів з часом не змінюється.

Амплітуда коливань рівна нулю в тих точках простору, в які хвилі з однаковою амплітудою приходять в протилежних фазах, тобто із зсувом за фазі на  $\pi$ , точніше - запізнюючись на непарне число  $(2k+1)$  напівперіодів. При однаковому законі коливань двох джерел хвиль відмінність на половину періоду коливань буде за умови, що різниця відстаней  $\Delta = l_1 - l_2$  від джерел хвиль до цієї точки дорівнює половині довжини хвилі або будь-якому непарному числу напівхвиль. Величина  $\Delta$  називається *різницею ходу хвиль*, що інтерферують, а умова:

$\Delta = l_1 - l_2 = (2k+1) \cdot \lambda/2$  - називається **умовою інтерференційного мінімуму**  
**Інтерференційні максимуми** спостерігаються в точках простору, в які приходять хвилі з однаковою фазою коливань. При однаковому законі коливань двох джерел повинна виконуватися умова рівності різниці ходу нулю або парному числу напівхвиль:  $\Delta = l_1 - l_2 = 2k \cdot \lambda/2$

Сутність хвильового процесу полягає в передачі енергії коливань від одних точок простору до інших. При інтерференції хвиль в місцях інтерференційних мінімумів енергія результуючих коливань менша від суми енергій двох хвиль, що інтерферують. Але в місцях інтерференційних максимумів енергія результуючих коливань перевищує суму енергій двох хвиль, що інтерферують, причому рівно на стільки, на скільки зменшилася енергія в місцях інтерференційних мінімумів. При інтерференції хвиль енергія коливань перерозподіляється в просторі, при цьому закон збереження енергії строго виконується.

Якщо в якійсь точці накладаються дві хвилі однакової частоти з амплітудами  $A_1$  і  $A_2$  і різницею ходу, рівною непарному числу напівхвиль, то амплітуда сумарного коливання:  $A = |A_1 - A_2|$ .

Але енергія коливання і інтенсивність хвилі пропорційні квадрату амплітуди:  $W = kA^2$ , тоді  $A^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2$ , отже, енергія сумарного коливання в даній точці поля і відповідно інтенсивність  $I \sim W$  виразяться так: .

При рівності амплітуд (і енергій), тобто при  $A_1=A_2 = A_0$  і  $I_1 = I_2 = I_0$ , коливань взагалі не буде:  $I_{\min} = I_0 + I_0 - 2I_0$ .

Якщо ж хвилі накладаються в точці з однаковими фазами, то для амплітуд маємо:  $A = A_1 + A_2$ ,  $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2$ , а для інтенсивності коливань матимемо: .

При рівних амплітудах і інтенсивності одержимо:  $A = A_0 + A_0 = 2A_0$ ,  $I_{\max} = 4I_0$ .

Отже, при інтерференції відбувається перерозподіл енергії, але середня енергія у всіх точках залишається рівною сумі енергій складових хвиль. Те ж відноситься і до інтенсивності хвиль.

Приклад 1. Два гучномовці підключено до одного звукового генератора. Яким буде результат інтерференції звукових хвиль на лінії, що проходить через середину відрізка, що сполучає гучномовці, перпендикулярної цьому відрізку?

Відповідь: Оскільки до вказаної точки хвилі від двох гучномовців проходять однаковий шлях, то вони приходять з однаковою фазою, тому в даній точці буде максимум.

Приклад 2. Два гучномовці підключено до одного звукового генератора з частотою 660 Гц. Яким буде результат складання звукових хвиль в точці, що знаходиться на відстані 1,25 м від першого гучномовця і на відстані 1 м від другого? Швидкість звуку в повітрі прийняти рівною 330 м/с.

Рішення.

$$\begin{aligned} v &= 660 \text{ Гц} \\ l_1 &= 1,25 \text{ м} \\ l_2 &= 1 \text{ м} \\ V &= 330 \text{ м/с} \end{aligned}$$

$$\lambda = vT; \quad V = \lambda v; \quad ;$$

A-?

Відповідь: Оскільки хвилі приходять в дану точку в протифазі, то спостерігатиметься мінімум:  $A = \min$ .

**4. Дифракція хвиль.** Якщо на шляху хвиль поставити перешкоду з широким отвором, то досвід показує, що хвилі проходять через отвір і поширюються майже прямолінійно у напрямі променя. В інших напрямках хвилі від отвору не поширюються. Це суперечить принципу Гюйгенса, згідно якому вторинні хвилі повинні поширюватися у всі сторони від точок поверхні, яких досягла первинна хвиля. Явище, що спостерігається при зустрічах хвиль з перешкодами, пояснив в 1885 р. О. Френель, доповнивши принцип Гюйгенса уявленням про інтерференцію вторинних хвиль. Відсутність хвиль в стороні від напрямку променя первинної хвилі за широким отвором згідно **принципу Гюйгенса-Френеля** пояснюється тим, що вторинні хвилі, що випускаються різними ділянками отвору, інтерферують між собою.

Якщо зменшити розміри отвору в перешкоді на шляху хвиль, то картина поширення хвиль за отвором зміниться. Чим менше отвір, тим більше відхилення від прямолінійного напрямку поширення зазнають хвилі. Відхилення напрямку поширення хвиль від прямолінійного напрямку біля краю перешкоди називається **дифракцією хвиль** (від лат. diffractus - розламаний).

**5. Поляризація хвиль.** Інтерференція і дифракція спостерігаються при поширенні як поздовжніх, так і поперечних хвиль. Проте поперечні хвилі мають ще одну властивість, яка відсутня у поздовжніх. Це можливість поляризації хвиль (від греч. polos, лат. polus - кінець осі, полюс). Термін

«поляризація» стосовно світла вперше ввів І. Ньютон в 1704-1706 рр. **Лінійно-поляризованою** (або плоскополяризованою) називається поперечна хвиля, коливання в якій відбуваються в одній площині. Плоскополяризована хвиля в гумовому шнурі виходить/утворюється при коливаннях кінця шнура в одній площині. Якщо ж кінець шнура коливається в різних напрямках, то хвиля, що поширюється вздовж шнура, не поляризована. Таку поперечну хвилю називають **природною**.

Хвилю можна поляризувати за допомогою пристрою, названого поляризатором, який зі всього спектру хвилі виділяє (пропускає) коливання в одній площині.

**6. Рівняння хвилі.** Хай вздовж осі  $X$  поширюється плоска електромагнітна хвиля, причому вектор напруженості здійснює коливання вздовж осі  $Y$ , а вектор індукції - вздовж осі  $Z$ . Як показали дослідження, всі оптичні явища викликаються дією електричної складової електромагнітного поля, тому вектор напруженості називають **світловим вектором**.

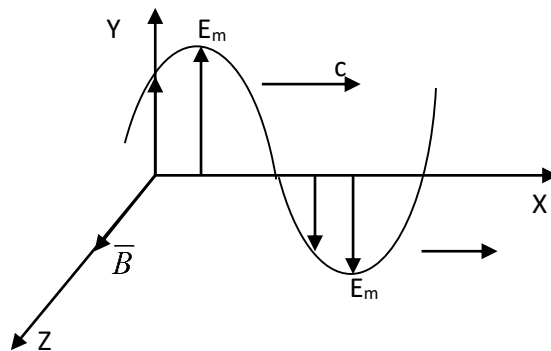


Рис.37

Треба пам'ятати, що коливання вектора напруженості пов'язані з коливаннями вектора індукції  $\vec{B}$ , причому у вільній хвилі, що поширюється у вакуумі або діелектрику, коливання обох векторів відбуваються в одній і тій же фазі (синфазні).

Припустимо, що у початку координат коливання вектора відбуваються за законом  $E_y = E_m \cos(\omega t + \varphi)$ , де  $E_m$  - амплітуда коливань вектора напруженості,  $\omega = 2\pi\nu$  - колова частота і  $\varphi$  - початкова фаза хвилі. В точці А, віддаленій від початку координат на відстань  $OA = x$ , коливання відбудеться із запізнюванням на  $\Delta t = x/c$ , де  $c$  - швидкість хвилі. Тоді в точці А:

$E_y = E_m \cos(\omega(t - \Delta t) + \varphi)$  або  $E_y = E_m \cos(\omega t - kx + \varphi)$  - рівняння плоскої хвилі. Воно справедливе для будь-якого значення  $x$ .

Хвиля називається **плоскою**, тому що у всіх точках площини  $YOZ$ , в якій коливаються вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$ , напрям вектора швидкості хвилі однаковий (перпендикулярний).

Число  $k$  називається **хвильовим числом**. Воно показує скільки довжин хвиль укладається на відстані  $2\pi$ , аналогічно тому, як колова частота показує, скільки періодів укладається в проміжок часу  $2\pi$ . Тоді рівняння плоскої хвилі  $E_y = E_m \cos(\omega t - kx + \varphi)$ .

**6. Стояча хвиля.** Нехай хвиля біжуча поширюється вздовж осі абсцис, доходить до перешкоди, розташованої на початку координат, і без втрат

енергії відбивається від неї, рухаючись вздовж осі абсцис в зворотному напрямі і зустрічається з прямою хвилею. В результаті можливі два випадки.

1) Хвиля відбивається в точці  $O$  в тій же фазі, в якій вона до неї дійшла.

Рівняння біжучої хвилі  $E_y = E_m \cos(\omega t - kx + \varphi)$ .

Рівняння відбитої хвилі  $(E_y)_{\text{отр}} = E_m \cos(\omega t + kx + \varphi)$ .

Додамо ці рівняння і застосуємо формулу суми косинусів.

Одержимо:  $E_y = 2E_m \cos kx \cdot \cos(\omega t + \varphi) = D_m \cos(\omega t + \varphi)$ ,

де величина  $D_m = |2E_m \cos kx|$  не залежить від часу.



Рис.38

В результаті додавання біжучої та відбитої хвиль утворюється нова хвиля, фаза якої не залежить від координат, зате від координат залежить амплітуда коливань. Така хвиля називається **стоячою**.

Точки, де амплітуда коливань рівна нулю, називаються **вузлами стоячої хвилі**.  $D_m = |2E_m \cos x| = 0$ , отже координати вузлів  $x_{\text{вуз}} = (2m+1)\lambda/4$ .

Точки, де амплітуда стоячої хвилі удвічі більше амплітуди хвилі, що біжить, називаються пучностями стоячої хвилі. Значення  $\cos x = \pm 1$ , отже, координати пучностей  $x_{\text{пуч}} = 2m\lambda/4$ .

2) Хвиля відбивається в точці  $O$  в протилежній фазі.

Рівняння відбитої хвилі  $(E_y)_{\text{отр}} = E_m \cos(\omega t + kx + \varphi + \pi)$ .

Амплітуда стоячої хвилі  $D_m = |2E_m \cos(x + \pi)| = |2E_m \sin x|$

Звідси видно, що замість вузлів виникнуть пучності, а замість пучностей виникнуть вузли стоячої хвилі.

### Світло як електромагнітна хвиля.

З теорії Максвелла випливає висновок про те, що світло - це електромагнітні хвилі певного діапазону. В ній обґрунтовувалася поперечність електромагнітних хвиль, а також той важливий факт, що швидкість їх поширення визначається електричними і магнітними властивостями середовища. Найважливішу роль в з'ясуванні природи світла зіграло дослідне визначення його швидкості.

1) **Метод Ремера**. О. Ремер в кінці XVII в. визначив швидкість світла за допомогою спостереження за Іо - супутником планети Юпітер. Земля і Юпітер рухаються по орбітах на різних відстанях від Сонця. Спостерігач, що знаходиться на Землі, бачить, що Іо виходить з тіні Юпітера в різний час при різних положеннях Землі відносно Сонця. Максимальна різниця складає

близько 22 хвилин (1320 с). Ремер справедливо припустив, що це запізнювання виникає внаслідок того, що світло, що має скінченну швидкість і проходить відстань, що збільшилася, за більший час. А максимальне збільшення відстані рівне діаметру орбіти Землі  $3 \cdot 10^{11}$  м.

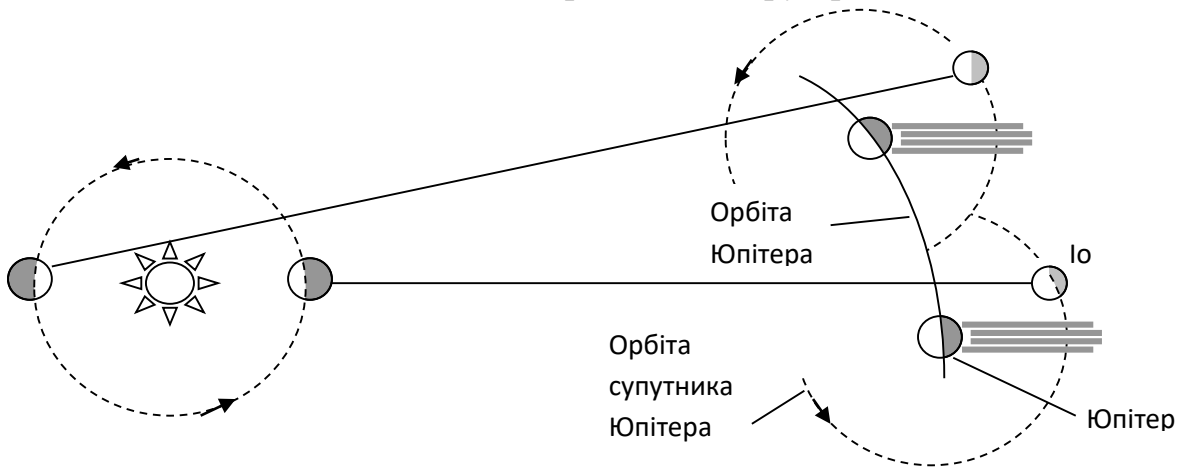


Рис.39

З цих спостерегань Ремером була визначена швидкість світла:

$$c = \frac{3 \cdot 10^{11} \text{ м}}{1320 \text{ с}} \approx 2,27 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

За часів Ремера був невірно визначений час запізнювання, тому одержаний ним результат істотно відрізняється від відомого зараз значення. Але, не дивлячись на неточний результат, досвід О. Ремера мав принципово важливе значення, довівши скінченність швидкості світла.

1. Метод Фізо. В 1849 р. А. Фізо поставив лабораторний досвід по вимірюванню швидкості світла. Світло від джерела S проходило через переривник К (зуби колеса, що обертається) і, відбившись від дзеркала З, поверталася знову до зубчатого колеса.

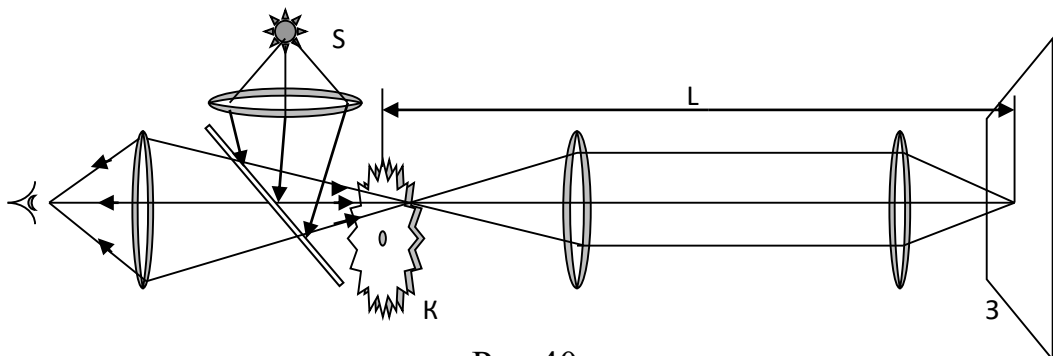


Рис.40

Припустимо, що зубець і проріз зубчатого колеса має однакову ширину, і місце прорізу на колесі зайняв сусідній зубець. Тоді світло перекриється зубцем, і в окулярі стане темно. Це наступить за умови, що час проходження світла туди і назад  $t_1 = 2L/c$  виявиться рівним часу повороту



зубчатого колеса на половину прорізу  $t_2 = \frac{T}{2N} = \frac{1}{2N\nu}$ . Тут  $L$  - відстань від зубчатого колеса до дзеркала;  $T$  - період обертання зубчатого колеса;  $N$  - число зубців;  $\nu = \frac{1}{T}$  - частота обертання. З рівності  $t_1 = t_2$  слідує розрахункова формула для визначення швидкості світла даним методом:  
 $c = 4LN\nu$ .

Використовуючи метод затвора, що обертається, Фізо в 1849 р. отримав значення швидкості світла  $c = 3,13 \cdot 10^8$  км/с, що було зовсім непогано на ті часи. Надалі використання різних затворів дозволило істотно уточнити значення швидкості світла. Так в 1950 р. отримано значення швидкості світла (у вакуумі), рівне  $c = (299793,1 \pm 0,25)$  км/с.

3) **Метод Майкельсона.** В іншому лабораторному методі переривання світла здійснювалося при обертанні дзеркала. Таким методом швидкість світла вимірювали Л. Фуко (в 1862 р.) і А. Майкельсон (в 1870 - 1926 рр). Спостерігаючи переривання світла при обертанні восьмигранної сталеві призми, віддаленої від джерела на 35,4 км (дослід проводився в горах), А. Майкельсон отримав значення швидкості світла, рівне  $c = (299796 \pm 4)$  км/с.

**Інтерференція і хвильові властивості світла.** Милуючись веселковими кольорами мильних плівок або кольоровими плямами масла на асфальті, ми, як правило, не замислюємося про причину цих явищ. Хоча з причиною - інтерференцією - ми знайомі.

Інтерференція - один з найпереконливіших доказів хвильових властивостей. Якщо можна здійснити інтерференцію світла, значить, він володіє хвильовими властивостями.

Проте інтерференцію світла не просто побачити, наприклад, при накладанні світла від двох настільних ламп.

**Дослід Юнга.** Інтерференцію світла вдалося спостерігати за допомогою установки, запропонованої Т. Юнгом. Він був одним з перших, хто зрозумів, що від двох незалежних джерел світла інтерференційну картину не отримати. Тому він пропустив в темну кімнату сонячне світло через вузький отвір  $S$  (див. мал.), потім за допомогою двох отворів  $S_1$  і  $S_2$  розділив цей пучок на два. Ці два пучки, накладаючись один на одний, утворили в центрі екрану білу смугу, а по краях - веселкові. Таким чином, в досліді Юнга інтерференційна картина отримується шляхом розподілу фронту хвилі, що випромінюється одним джерелом, при її проходженні через два близько розташованих отвори.

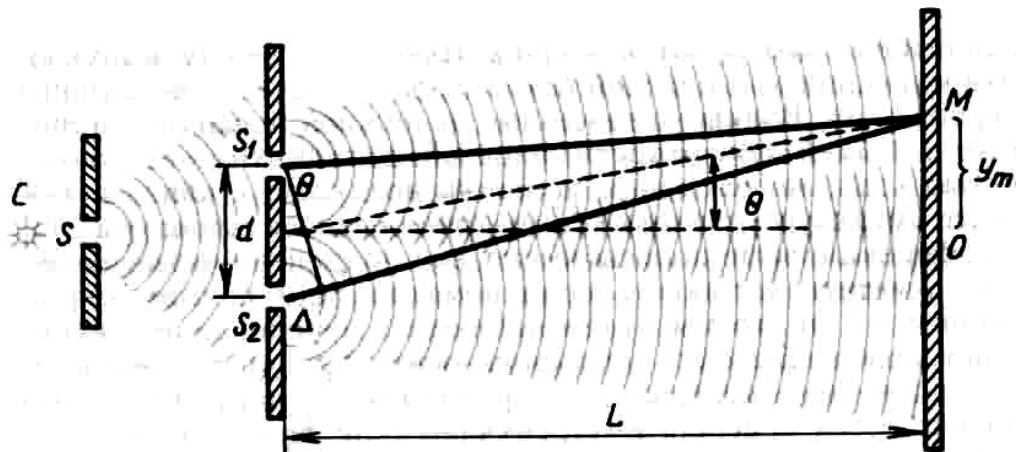


Рис.41

У своєму досліді Юнг достатньо точно визначив довжину світлової хвилі: для крайньої фіолетової частини спектру він отримав значення довжини хвилі 0,42 мкм, для червоного світла - 0,7 мкм.

**Кольори тонких плівок.** Повернемося тепер до з'ясування причин виникнення веселкових плям на асфальті або мильних плівок. Біле світло падає на тонку

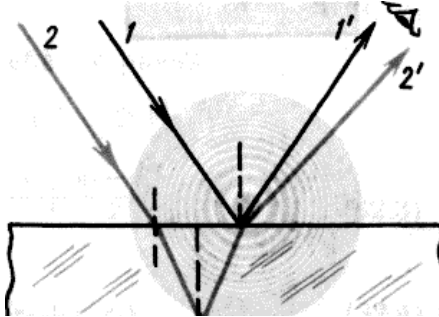


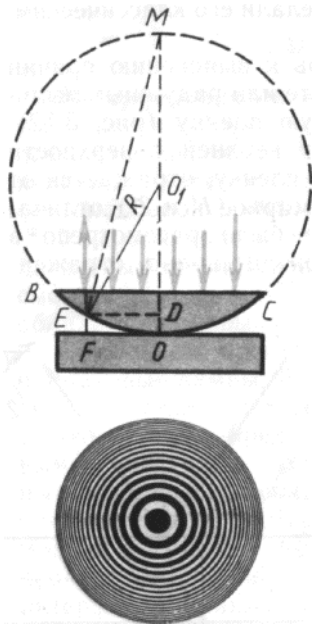
Рис.42

плівку (см.рис.). Частково світло (хвиля 1) відбивається від верхньої поверхні плівки, частково (хвиля 2), пройшовши через плівку, відбивається від її нижньої поверхні. Обидві відбиті хвилі (1' і 2') відрізняються різницею ходу. Природно, що більший шлях проходить хвиля, відбита від нижньої поверхні плівки, хоча різниця ходу невелика - ненабагато перевищує подвоєну товщину плівки.

Біле світло немонахроматичне, воно містить електромагнітні хвилі різної довжини - від 400 до 760 нм. Через те, що різниця ходу залежить від довжини хвилі, максимуми інтерференційної картини для різних довжин хвиль утворюються в різних точках приймача (наприклад, на сітківці ока). Саме тому плівки мають веселкове забарвлення.

Аналогічно виникають і **кільця Ньютона**. Між опуклою поверхнею лінзи і плоскою пластинкою утворюється повітряний клин. Хвилі, відбиті від нижньої поверхні лінзи і від верхньої поверхні плоскої пластинки, відрізняються різницею ходу, що залежить від товщини повітряного клину в даному місці.

А оскільки установка симетрична щодо осі  $OO_1$ , то інтерференційні смуги мають вид концентричних кілець. Якщо освітити установку монохроматичним світлом - червоним, синім і т. ін., то ми спостерігатимемо чергування кольорових і темних кілець. Якщо ж установку освітити білим світлом, то кільця виявляться спектрально забарвленими: зовнішня частина кільця виявиться червоною, внутрішня - синьо-фіолетовою.



Таким чином, ми бачимо, що інтерференція світла супроводжується його спектральним розкладанням на монохроматичні складові. Інтерференційна картина в світлі, що проходить, відрізняється від картини у відбитому світлі, оскільки у відбитому світлі відбувається втрата півхвилі. Тому, якщо у відображеному світлі відбувається гасіння світла (хвильова різниця ходу - непарне число півхвиль), то в світлі, що проходить, - його посилення (парне число півхвиль) або навпаки.

Рис.43

Досвід показує, що існує явище інтерференції світла, а значить, світло має хвильову природу. Чому ж не спостерігається інтерференція від двох незалежних джерел світла, наприклад від двох ламп, навіть якщо вони випромінюють хвилі однакового спектрального складу? Адже одержати такі хвилі зовсім не важко, Достатньо пропустити світло через один і той же світлофільтр. І все одно інтерференції не буде.

Оскільки світло випромінюється одночасно величезною кількістю атомів і випромінюють вони незалежно один від одного, то реальна світлова хвиля є набором хвиль з фазами, що хаотично змінюються. Тобто фаза - випадкова функція часу. Хвилі, фази яких змінюються випадково і незалежно одна від одної, називаються некогерентними. Інтерференція ж може виникнути тільки при додаванні хвиль однакової частоти. На мові оптики це означає, що хвилі повинні бути монохроматичними (одноколірні). А стійка інтерференційна картина у просторі та часі виходить при накладанні когерентних (узгоджених) хвиль, тобто хвиль, що мають однакову частоту і постійну різницю фаз.

**Дифракційні ґратки.** Використання дифракції світла на одній щілині в практичних цілях є вельми незручним через слабку видимість дифракційної картини. Спеціальний пристрій - дифракційні ґратки - володіє рядом переваг і внаслідок цього знаходить практичне застосування.

**Дифракційна ґратка** - спектральний прилад, призначений для розкладання світла в спектр і вимірювання довжини хвилі. Ґратки бувають металевими або скляними. На ці ґратки наноситься велике число паралельних штрихів: кращі металеві ґратки мають до 2000 штрихів на один міліметр поверхні (див. мал.). При цьому загальна довжина ґраток складає 100 - 150 мм.

Спостереження на металевих ґратках проводяться тільки у відбитому світлі, а на скляних - найчастіше світлі, що проходить.

Розглянемо ґратку, в якій щілини шириною  $b$  чергуються з непрозорими ділянками завширшки  $a$ . Обидві ці величини визначають одну з головних характеристик ґратки - її період  $d = a + b$ , що інакше називають **сталю ґратку** (див. мал.). Нехай на ґрати ґратку падає паралельний пучок світла, яке дифрагує на щілинах. Дифракційну картину, що вийшла, можна спостерігати у фокальній площині лінзи, на яку падає дифрагований пучок (наприклад, на кришталик ока), або на екрані, нескінченно віддаленому від ґратки.



Рис.44

Припустимо, що світло дифрагує на щілинах ґратки під кутом  $\varphi$ . Різниця ходу двох променів, що надходять від відповідних точок сусідніх щілин, визначається виразом  $\Delta = d \sin \varphi$ . В тих напрямках (тобто для таких кутів  $\varphi$ ), для яких різниця ходу рівна парному числу напівхвиль, спостерігається інтерференційний максимум. Навпаки, для тих напрямів, де різниця ходу рівна половині довжини хвилі або непарному числу півхвиль, виникає інтерференційний мінімум. Отже, в напрямках, де кути  $\varphi$  задовольняють умові:  $d \sin \varphi = m\lambda$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) спостерігаються **головні максимуми** дифракційної картини.

Аналіз співвідношення для максимумів дає багато корисного. З нього видно, що різним довжинам хвиль відповідають різні кути, на яких спостерігаються інтерференційні максимуми. На цьому заснована головна

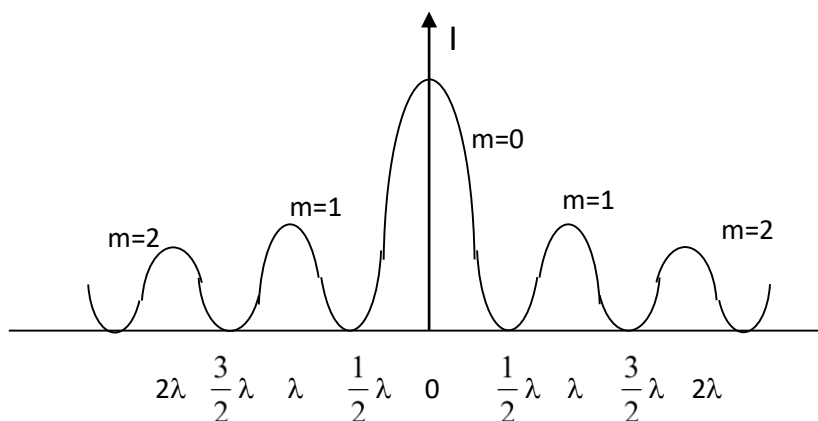


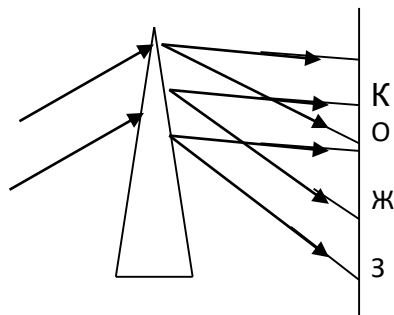
Рис.45

властивість дифракційних ґраток - розкладання падаючого на неї немонохроматичного, наприклад - білого, світла в спектр.

Аналіз тієї ж формули показує необхідність виготовлення ґраток з малим періодом. Через те, що  $\sin \varphi = m\lambda/d$ , ясно, що великі дифракційні кути (тобто ширший спектр) дають ґратки з малим періодом. Очевидно також, що  $m\lambda/d < 1$ , тобто  $m < d/\lambda$ , оскільки  $\sin \varphi \leq 1$ .

При освітленні ґраток немонохроматичним, наприклад, білим світлом тільки максимум нульового порядку має білий колір, оскільки  $m = 0$   $\varphi = 0$  для всіх довжин хвиль. Симетрично щодо спектру нульового порядку розташовуються спектри першого, другого і подальших порядків. Через те, що довжина хвилі синього кольору менше від довжини хвилі червоного, відповідно до співвідношення  $\sin \varphi = m\lambda/d$  дифракційний кут для синього кольору менший ніж для червоного. Тому завжди в спектрі червоні лінії розташовані далі синіх від центру дифракційної картини.

**Дисперсія і поглинання світла.** Розкладання білого світла в спектр за допомогою скляної призми вперше було вивчено І. Ньютоном. Він довів, що біле світло розкладається в спектр, але монохроматичне світло (наприклад,



червоний, синій, фіолетовий) далі на спектральні складові не розкладається. Дослід показав, що фіолетові промені відхиляються від початкового напрямку сильніше, ніж червоні. Ньютон напрямив на призму світловий пучок малого поперечного перетину. Потрапляючи на призму, світло заломлювалося і давало на протилежній стіні подовжене зображення з веселковим чергуванням кольорів.

Рис.46

Ньютон виділив сім основних кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий і веселкову смужку назвав спектром. Якщо на призму напрямляти світло певного кольору, то розкладання в спектр не відбудеться.

**Показник заломлення електромагнітних хвиль .** Швидкість поширення електромагнітної хвилі в речовині виявилася пов'язаною з константами речовини, в якій ця хвиля поширюється. Залежність показника заломлення світла від його кольору фактично означає його залежність від довжини хвилі, точніше - від її частоти.

Залежність швидкості світла (а значить, і показника заломлення) в речовині від частоти хвилі називається **дисперсією**.

Дисперсію не могла пояснити ні електромагнітна теорія Максвелла, ні теорія Френеля, оскільки у той час не було ще достатніх знань про будову речовини.

Класична електронна теорія Лоренца, розроблена в кінці XIX в, пояснює дисперсію світла як результат вимушених коливань електронів, що входять до складу атома, під дією поля електромагнітної хвилі.

Дисперсія властива всім середовищам, окрім абсолютного вакууму. Для переважної більшості речовин показник заломлення збільшується із збільшенням частоти. Але в 1862 р. в експерименті Леру знайшов, що в парах йоду червоне світло заломлюється сильніше, ніж синє. Така дисперсія була названа *аномальною*. Пізніше аномальну дисперсію відкрили в рідинах. Всі тіла, яким властива аномальна дисперсія, сильно поглинають світло в цій же ділянці спектру, що свідчить про резонансне походження цього явища. Електрони атомів і молекул здійснюють вимушені коливання під дією електричного поля з частотою, рівною частоті світла. Якщо частота світлової хвилі наближається до частоти власних коливань, то виникає явище резонансу, що зумовлює поглинання світла. Поглинута енергія може переходити в інші види, зокрема, вона може перетворюватися на енергію хаотичного, теплового руху частинок речовини.

### Контрольні питання

1. Що називається хвилею?
2. Чим відрізняються подовжні хвилі від поперечних?
3. Чи переносять хвилі масу речовини?
4. Які основні характеристики хвиль ви знаєте?
5. Що таке електромагнітна хвиля?
6. Основні положення теорії Максвелла і слідства з неї?
7. Що таке швидкість світла?
8. Які основні властивості електромагнітних хвиль?
9. Як формулюється принцип Гюйгенса?
10. Як формулюється принцип Гюйгенса-Френеля?
11. Як формулюється закон віддзеркалення? Закон заломлення?
12. Що таке внутрішнє віддзеркалення?
13. Що таке інтерференція? Які умови інтерференційних максимумів і мінімумів?
14. Що таке дифракція і поляризація хвиль?
15. Чим характеризуються стоячі хвилі?
16. Якими методами можна визначити швидкість світла?
17. Які основні хвильові властивості світла?
18. Коли виникають кільця Ньютонa?
19. Які основні характеристики і властивості дифракційних ґрат?
20. Що таке дисперсія і поглинання світла?

## 9. УТВОРЕННЯ І ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ДОСЛІДИ ГЕРЦА. ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ, ДОВЖИНА І ЧАСТОТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ

### Випромінювання хвиль. Елементарні випромінювачі

Для збудження біжучих хвиль і їх подальшого поширення (*випромінювання*) необхідно в окремій точці тіла або середовища створити коливання, тобто підключити зовнішнє джерело коливань.

Механічне джерело коливань створює деформацію, яка періодично змінюється, і за рахунок пружних властивостей тіла (*середовища*) буде передаватися від точки до точки тіла з скінченою швидкістю. В коливальний рух прийдуть поступово усі точки тіла одна за одною. Якщо тіло безмежне, то таке коливання буде весь час рухатись вперед і створить біжучу хвилю, тобто передаватиме енергію.

Тому під випромінюванням можна розуміти перенос енергії з області, де розміщене джерело коливань, у навколишнє середовище.

Такі перетворення коливань можуть здійснюватись неодноразово. На цьому ґрунтується, наприклад, перехоплення звукових повідомлень (*акустичних хвиль у просторі, хвиль в конструкціях, які виникають під дією вільних акустичних хвиль, знову хвиль у просторі або в воді, і без врахування перетворення акустичних хвиль у електричні сигнали або у електромагнітні хвилі*).

ЕМП, ЕМХ, ЕМ випромінювання виникають в усіх випадках, коли в просторі змінюється змінне ЕМП. А джерелом змінного ЕМП, тобто ЕМХ, є змінні електричні струми або пульсуючі електричні заряди, тобто заряди, які рухаються.

Найпростішими системами, які створюють, є магнітний і електричний диполі зі змінним моментом.

Таким електричним диполем є система, яка складається з нерухомого позитивного заряду і здійснюючого біля нього рух негативного заряду. Якщо це коливання відбувається за гармонічним законом, то дипольний момент також буде змінюватись за цим законом  $p = p_0 \cos \omega t$ .

Значення цієї простої моделі дуже велике, тому що багато реальних систем поводять себе з достатньою точністю так само, як ідеальні диполі. Навіть електричні нейтральні системи є сукупністю великої кількості елементарних диполів (*атоми, молекули*) і тому вони складають основну долю випромінювачів ЕМХ.

Магнітним диполем є система, в якій розподіл електричного заряду, а тому і дипольний момент залишається незмінним, в той час як густина струму, а тобто і магнітний момент, змінюються у часі. Основний приклад – це рамка, по якій протікає змінний електричний струм. У рамці змінюється дипольний магнітний момент (*електричний дорівнює нулю*), що призводить до

випромінювання ЕМХ. Але зрозуміло, що ефективність випромінювання різних систем, в яких діють змінні струми, буде різною.

Так, звичайний коливальний контур буде випромінювати незначну долю енергії, тому що електричне поле контуру зосереджено в конденсаторі і струми зміщення замикаються між обкладинками конденсатора найкоротшим шляхом. Магнітне поле зосереджено в основному в котушці. Передача енергії від конденсатора і котушки в простір буде невеликою.

Необхідна система, в якій зміни ЕМП охоплює найбільший об'єм простору.

Так системи, які спеціально призначені для випромінювання електромагнітної енергії (ЕМЕ), називаються передавальними антенами. Ця антена перетворює енергію електричного струму в енергію ЕМХ. Зворотна задача вирішується приймальною антеною. Для вивчення властивостей цих пристроїв необхідно вивчити принципи випромінювання хвиль і властивості простіших випромінювачів (*симетричного вібратора, елементарної рамки, площадки і таке інше*).

### **Випромінювання ЕМХ**

Раніше ми відмітили, що ЕМ випромінювання виникає тоді, коли електричні заряди рухаються нерівномірно (прискорено).

В коливальних системах рух здійснюється зі змінними прискореннями, тому коливання електричних зарядів дають ЕМВ.

В хаотичному тепловому русі частинок також створюється ЕМВ (інфрачервоне випромінювання).

Видиме світло і ультрафіолетові промені створюються рухом атомних електронів.

При дуже різкому гальмуванні зарядів, наприклад, при попаданні пучка електронів на перешкоду, створюються рентгенівські промені.

Пульсації ядерного заряду приводять до створення  $\gamma$ -променів.

Інтенсивність випромінювань пропорційна четвертому степеню частоти.

**1. Випромінювання енергії електричним зарядом.** Електричний заряд, який рухається у вакуумі рівномірно, не випромінює енергії. Це впливає з принципу відносності, який полягає в рівноправності всіх інерціальних систем відліку. У системі, яка рухається із зарядом, він нерухомий, а нерухомі заряди не випромінюють.

Інша картина виникає у випадку, коли заряд під дією зовнішніх сил рухається з прискоренням. Поле, що має енергію, а отже і масу, образно кажучи, відривається від заряду і випромінюється у простір зі швидкістю світла. Випромінювання відбувається, доки на заряд діє зовнішня сила, що надає йому прискорення.

*Тільки заряди, які рухаються із прискоренням, можуть передавати енергію за допомогою створюваного ними електромагнітного поля.*



**2. Відкритий коливальний контур.** Будь-яке коло змінного струму випромінює енергію. Однак звичайний коливальний контур випромінює вкрай слабо. Це відбувається з двох причин:

- 1) недостатньо висока частота (інтенсивність випромінювання пропорційна частоті в четвертому степені);
- 2) хвилі, випромінювані різними ділянками контуру, перебувають у протифазі й гасять одна одну.

*Контур, який не випромінює у простір електричної енергії, називається, **закритим**.*

Щоб зробити випромінювання більш інтенсивним, потрібно суттєво підвищити частоту. Якщо робити висновки на підставі формули  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , для цього треба зменшити  $L$  і  $C$ . Видалення котушки індуктивності й віддалення пластин конденсатора веде до різкого збільшення частоти. Щоб коливальний контур добре випромінював електромагнітні хвилі необхідно збільшити об'єм простору, в якому відбувається утворення електромагнітного поля. Для цього контур необхідно розгорнути (зробити відкритим), чого найпростіше досягти розсуванням пластин конденсатора на максимально можливу відстань. Послідовні фази одержання такого відкритого коливального контуру показано на *рис.47*.

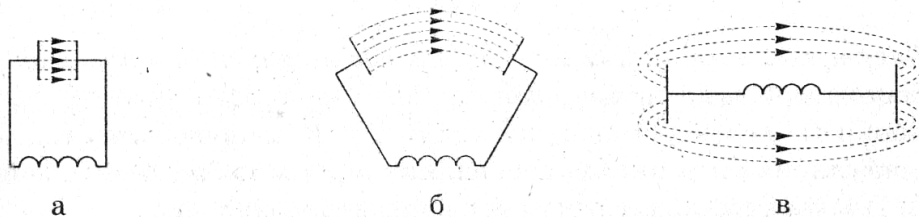


Рис.47

На *рис.47*, в зображено відкритий коливальний контур (вібратор Герца). Ємність та індуктивність вібратора Герца малі, тому частота коливань велика. В розгорнутому (відкритому) контурі електричне поле заповнює весь навколишній простір, і зміна цього поля з часом створює змінне у просторі магнітне поле, яке в свою чергу створює змінне електричне поле. Обидва ці процеси взаємозв'язані і утворюють електромагнітну хвилю, яка поширюється в просторі. Наявність на кінцях вібратора пластин необов'язкова. Вібратор є найпростішим випромінювачем електромагнітних хвиль. Коливальний процес у відкритому коливальному контурі (вібраторі) відбувається аналогічно процесу в закритому коливальному контурі. За допомогою коливального контуру можна дістати електромагнітне випромінювання необхідної потужності, не розсовуючи обкладок конденсатора. З цією метою один бік контуру слід заземлити, а до другого підключити натягнений вертикально провід, залишивши його верхній кінець вільним (*рис.48*). В результаті змінні електричне і магнітне поля охоплюють простір між вертикальним проводом і землею і потужність випромінювання такого контуру сильно зростає. Такий

пристрій називають *антеною*, а коливальний контур, забезпечений антеною, — *відкритим*.

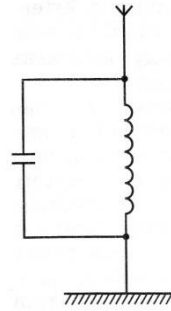


Рис.48

Для безперервного випромінювання у простір електромагнітних хвиль вібратором чи антеною необхідно створювати в них незгасаючі електромагнітні коливання. Це можна зробити, здійснивши індуктивний зв'язок між вібратором і котушкою індуктивності високочастотного генератора (рис.49).

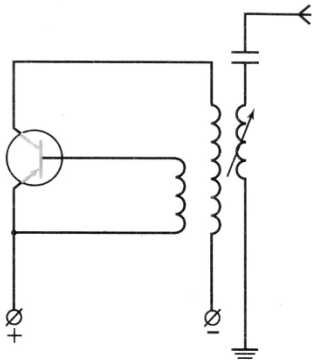


Рис.49.

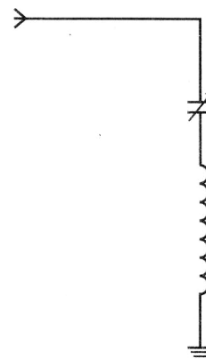


Рис.50.

У вібраторі індукватиметься струм високої частоти, який збігатиметься з частотою коливань струму в генераторі. Амплітуда коливань у вібраторі буде найбільшою, якщо частота власних коливань збігатиметься з частотою генератора (резонанс). При цьому буде максимальною й інтенсивність випромінюваних вібратором електромагнітних хвиль. Тому завжди добиваються, щоб вібратор був настроєний у резонанс з генератором електричних коливань.

Отже, щоб дістати інтенсивні електромагнітні хвилі, необхідно мати генератор незгасаючих коливань і хвиль (вібратор або антену). Випромінювач має бути певним чином зв'язаний з генератором (наприклад, індуктивним), щоб електричні коливання від генератора передавались до нього.

Приймання електромагнітних хвиль здійснюється за допомогою таких самих відкритих коливальних контурів — вібраторів або антен, подібних до випромінюючого контуру (рис.50). Під дією змінного електричного поля електромагнітної хвилі у приймальному контурі виникають електромагнітні коливання. Для якісного приймання необхідно, щоб приймальний коливальний контур було налаштовано у резонанс з передавальним контуром,

тобто щоб власна частота коливань контуру приймальної антени була близькою до частоти коливань контуру передавальної антени. Налаштування приймального контуру в резонанс здійснюється конденсатором змінної ємності або котушкою змінної індуктивності.

### 3. Випромінювання електромагнітних хвиль відкритим коливальним контуром.

Коливальний процес у вібраторі відбувається аналогічно процесу в закритому коливальному контурі.

Під час збудження у відкритому коливальному контурі коливань із великою амплітудою навколо контуру виникають поля  $\vec{E}_1$  і  $\vec{B}_1$ , пов'язані із зарядами і струмом у контурі. Змінні поля  $\vec{E}_1$  і  $\vec{B}_1$  індукують відповідно поля  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  (рис.51), які «поводяться» зовсім інакше. Електричне поле  $\vec{E}$ , створене змінним магнітним полем, і магнітне поле  $\vec{B}$ , створене змінним електричним полем, зменшуються з відстанню як  $1/r$  (поля  $\vec{E}_1$  і  $\vec{B}_1$  різко зменшуються і на порівняно невеликих відстанях малі). Ці поля вже не зв'язані із зарядами й струмами, що їх створили, і поширюються в просторі зі швидкістю світла, переносячи із собою енергію. Вони взаємно індукують одне одного, утворюючи вільне електромагнітне поле.

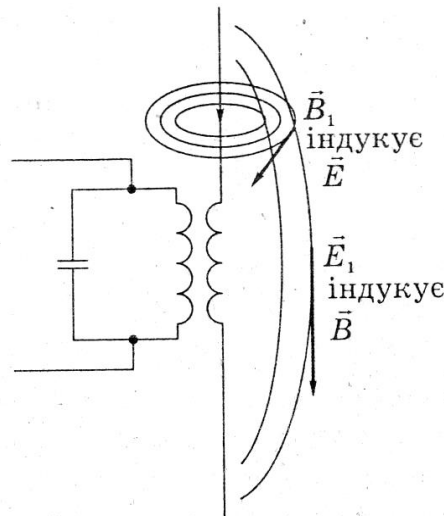


Рис.51

**Електромагнітна хвиля** — це процес поширення в просторі з часом вільного електромагнітного поля.

Оскільки в електромагнітній хвилі  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  змінюються у взаємно перпендикулярних площинах, перпендикулярних до напрямку їх поширення (рис.52), електромагнітна хвиля є поперечною хвилею.

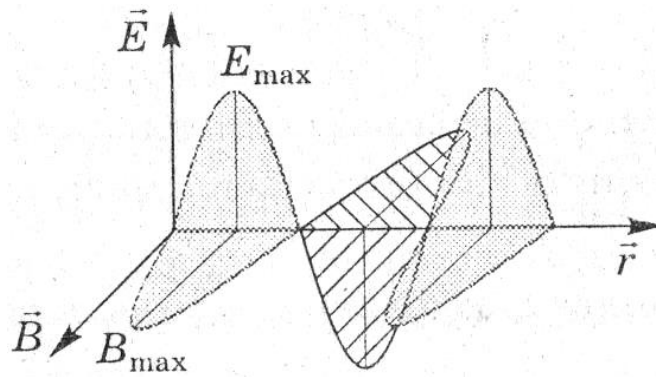


Рис.52

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі, визначається виразом:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}, \quad c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

$\varepsilon_0$  – електрична стала ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/Н·м<sup>2</sup>)

$\mu_0$  – магнітна стала ( $1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м)

**4. Властивості електромагнітної хвилі.** Електромагнітні хвилі поглинаються, відбиваються й заломлюються подібно до всіх інших видів хвиль. Використовуючи генератор надвисоких частот (НВЧ), можна продемонструвати учням такі властивості електромагнітних хвиль:

- 1) поглинання;
- 2) відбивання;
- 3) заломлення;
- 4) поперечність
- 5) дифракція
- 6) інтерференція.

**5. Енергія електромагнітної хвилі.** Як відомо, електромагнітна хвиля переносить енергію. Енергія електромагнітної хвилі складається з енергій електричного  $W_e$  і магнітного  $W_m$  полів:  $W = W_e + W_m$ .

Енергія електричного поля зарядженого конденсатора дорівнює:

$$W_e = \frac{CU^2}{2}$$

Підставляючи в цю формулу вирази для ємності плоского конденсатора ( $C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$ ) і різниці потенціалів між обкладками ( $U = Ed$ ), дістаємо:

$$W_e = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S E^2}{2} d = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 V, \quad \text{де } V = dS \text{ — об'єм конденсатора.}$$

Енергія магнітного поля котушки:  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ . Індуктивність котушки дорівнює  $L = \mu \mu_0 \frac{n^2 S}{l}$ , де  $\mu$  — магнітна проникність речовини осердя,

$n$  — кількість витків,  $S$  — площа поперечного перерізу,  $d$  — його довжина.

Якщо по котушці проходить струм силою  $I$ , то індукція магнітного поля всередині котушки  $B = \mu\mu_0 \frac{nI}{l}$ , звідки  $I = \frac{Bl}{\mu\mu_0}$ .

Таким чином, для енергії магнітного поля ми дістаємо вираз:

$$W_m = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} lS = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V, \text{ де } V = lS \text{ — об'єм котушки індуктивності.}$$

Отже, енергія електромагнітної хвилі дорівнює:

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 V + \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V$$

**6. Густина енергії електромагнітної хвилі.** Густина енергії електромагнітної хвилі можна обчислити, розділивши вираз для  $W_e$  і вираз для  $W_m$  на об'єм, зайнятий електричним полем, та об'єм, зайнятий магнітним полем, відповідно:

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu\mu_0} B^2$$

Оскільки енергія й густина енергії електромагнітної хвилі є функцією напруженості електричного й індукції магнітного полів, то швидкість передавання енергії у просторі дорівнює швидкості поширення поля.

Густиною потоку випромінювання називається добуток густини енергії електромагнітної хвилі та швидкості її поширення:

$$J = wv = v \left( \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu\mu_0} B^2 \right).$$

Густина потоку випромінювання чисельно дорівнює енергії, що переноситься електромагнітною хвилею в одиницю часу через одиничну площадку, перпендикулярну до напрямку поширення енергії.

### Контрольні питання

1. Що є джерелом випромінювання електромагнітних хвиль?
  - А Відрізок дроту, по якому йде постійний струм
  - Б Заряд, який рухається з прискоренням
  - В Нерухомий постійний магніт
  - Г Нерухомий електричний заряд
  
2. Електричне поле електромагнітної хвилі здійснює коливання в напрямку, який:
  - А збігається з напрямком коливань магнітного поля хвилі
  - Б протилежний напрямку поширення хвилі
  - В має кут  $45^\circ$  в напрямку поширення хвилі
  - Г перпендикулярний до напрямку коливань магнітного поля хвилі
  
3. За поширення у вакуумі електромагнітної хвилі її:
  - А швидкість зберігає напрямок та значення
  - Б період змінюється за гармонічним законом
  - В частота весь час зростає
  - Г довжина хвилі весь час зменшується
  
4. Довжиною електромагнітної хвилі є:
  - А час, за який магнітне поле хвилі здійснить одне повне коливання
  - Б відстань від джерела, на якій амплітуда хвилі зменшується у 2 рази
  - В відстань, яку проходить хвиля за один період
  - Г час, за який електричне поле хвилі здійснить одне повне коливання
  
5. У коливальному контурі радіопередавача конденсатор  $0,01$  мкФ підключено до котушки з індуктивністю  $0,4$  мГн. Визначте (у кіловольтах) максимальну напругу на обкладках конденсатора під час роботи передавача, якщо амплітуда сили струму в контурі передавача сягає  $100$  А.
  
6. Визначте (у мікрогенрі) індуктивність контуру радіоприймача, який налаштовано на прийом хвиль довжиною  $62,8$  м. Під час роботи приймача амплітуда напруги на обкладках конденсатора вхідного коливального контуру становить  $1,8$  В, амплітуда сили струму  $0,2$  мА.

## 10. ТИПИ АНТЕН. ОСОБЛИВОСТІ ДІАГРАМ СПРЯМОВАНOSTІ АНТЕН В ЗОНІ ФРЕНЕЛЯ

Існують передавальні антени, призначені для випромінювання радіохвиль, і прийомні антени. Антени - взаємні пристрої, їх можна використовувати і для випромінювання, і для прийому.

Є величезна кількість типів антен, що розрізняються діапазонами робочих частот і діаграмами спрямованості. При проектуванні антен задаються наступні параметри:

- смуга частот;
- вид діаграми спрямованості і поляризація випромінюваних (або прийнятих) радіохвиль;
- мінімальні втрати енергії в антені;
- вхідний опір і максимальний в фідері;
- мінімальний шум (для прийомних антен).

Антени класифікуються за різними ознаками: за частотою, видом діаграми спрямованості, конструкцією. Залежно від конструкції, існують такі типи антен:

- лінійні;
- апертурні;
- антенні решітки.

**Лінійні антени.** Особливістю лінійних антен є те, що їх поперечні розміри малі в порівнянні з повздовжними. До лінійних відносять дротові (рис. 53, а-в), щілинні (рис. 53, г) і та смужкові (рис. 53, д) антени.

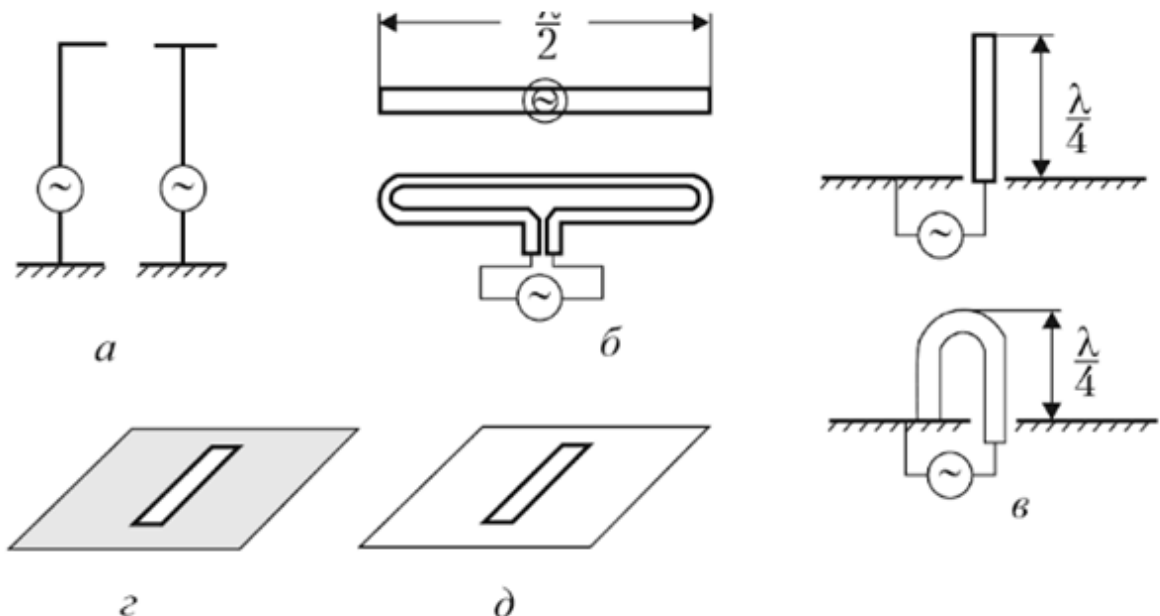


Рис.53 Лінійні антени

*a* – Г- і Т-подібні; *б* – симетричні і петлеві півхвильові вібратори; *в* – івертьхвильові вібратори; *г* – щілинний випромінювач в металевому екрані; *д* – смужковий випромінювач на діелектричній підлощі.

Г-і Т-подібні антени виконані з провідника вузького перетину і застосовуються на низьких частотах. Вібраторні щілинні і смужкові антени застосовують в різних частотних діапазонах, в тому числі і на НВЧ. Лінійні антени створюють, як правило, слабонапрявлене випромінювання.

**Апертурні антени.** У апертурних антенах випромінювання відбувається в певній площині, так званій апертурі, або площині розкриття. До цього типу антен відносяться рупорні, дзеркальні і лінзові антени (рис.54).

Найпростішою апертурною антеною є хвилеводний рупор (рис.54а). Поширеним типом розглянутого виду є дзеркальні антени, що представляють собою параболоїд обертання, опромінюваний, наприклад, рупором (рис.54б). До апертурних відносяться і лінзові антени, виконані з високоякісного діелектрика (рис.54в).

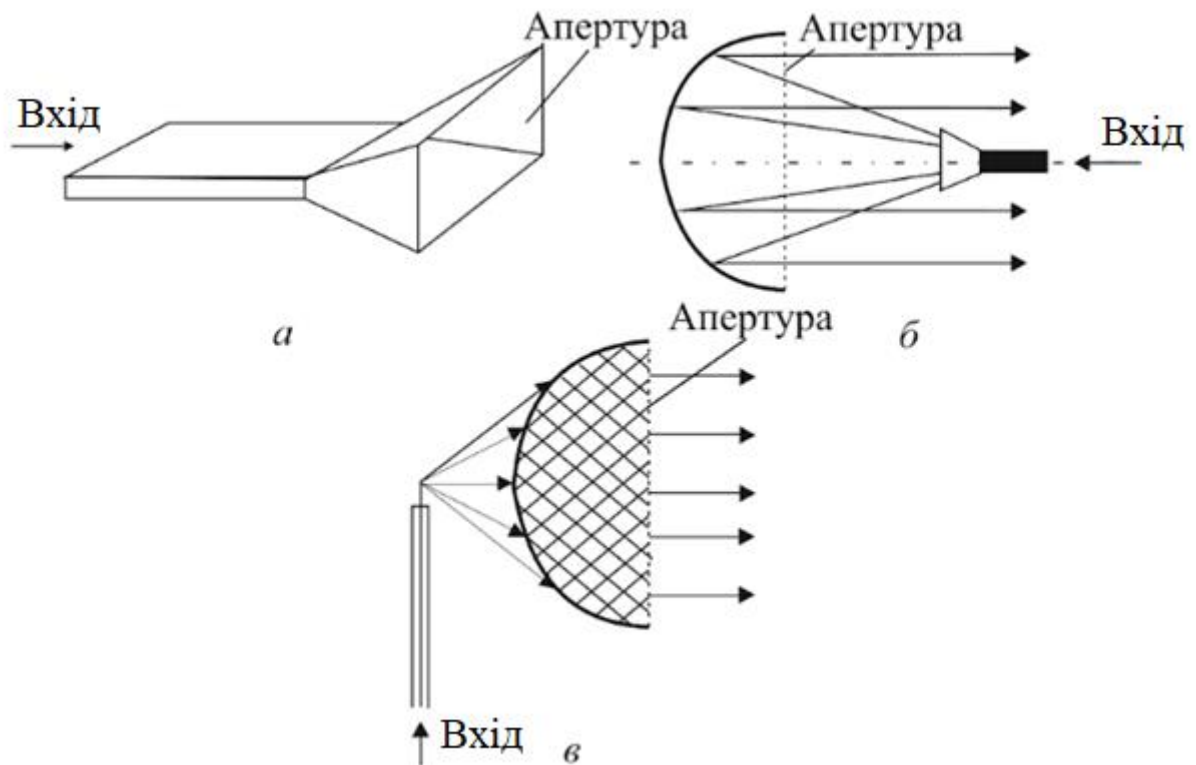


Рис. 54 Апертурні антени

Розміри апертури зазвичай значно більші за довжину хвилі, в результаті чого можливе створення гостронаправлених променів.



**Антенні решітки.** Антенною решіткою називається сукупність ряду випромінювачів, розташованих на певній поверхні. У найпростішому випадку - це лінійка випромінювачів (рис.55)

Фазована антенна решітка складається з набору одиночних випромінювачів, сукупність яких забезпечує формування діаграми спрямованості. Напрямок максимального зусилля визначається відповідною підстройкою амплітуд та фаз між різними випромінюючими елементами. Принцип фазуючої решітки показано на рис.55.

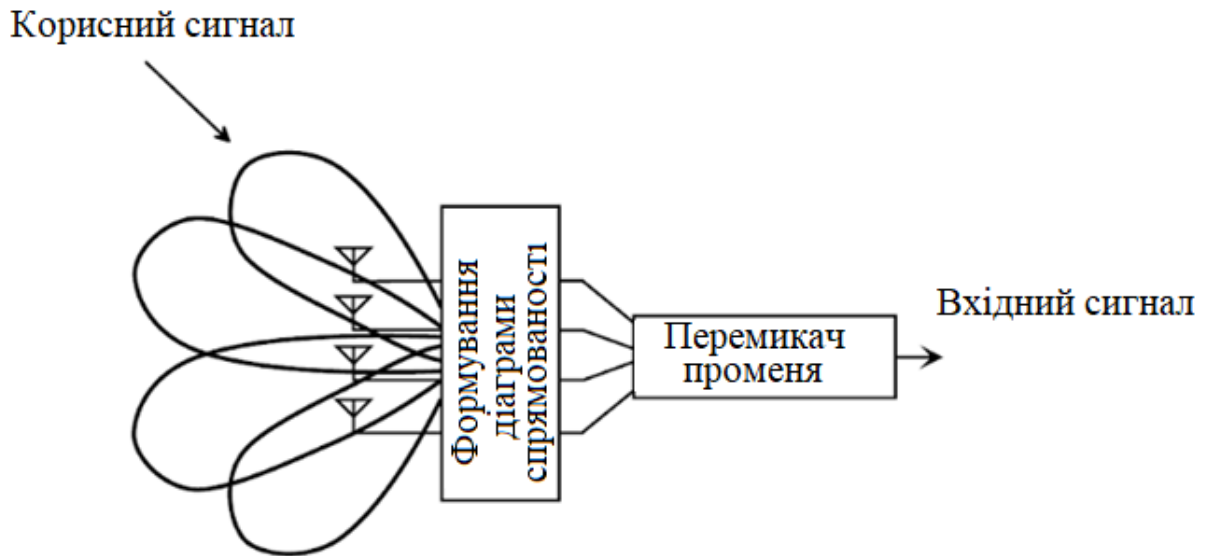


Рис. 55. Концепція роботи фазованої антенної решітки

Антенні решітки дозволяють зужувати діаграму спрямованості. Якщо на шляху електромагнітної хвилі поставити керований фазообертач, то стає можливим змінювати напрямок випромінювання, створювати багатопроменеву діаграму спрямованості або випромінювання спеціальної форми.

Антенні решітки з можливістю керування фазою коливань, випромінюваних в окремому елементі, називають фазованими антенними решітками (ФАР) (рис.55)

Для зменшення потужності джерела коливань, яке живить решітки, збільшення надійності передавальної системи послідовно з фазообертачами включають підсилювачі потужності (ПП) (рис.56). Такі антени називають активними фазованими антенними решітками (АФАР).

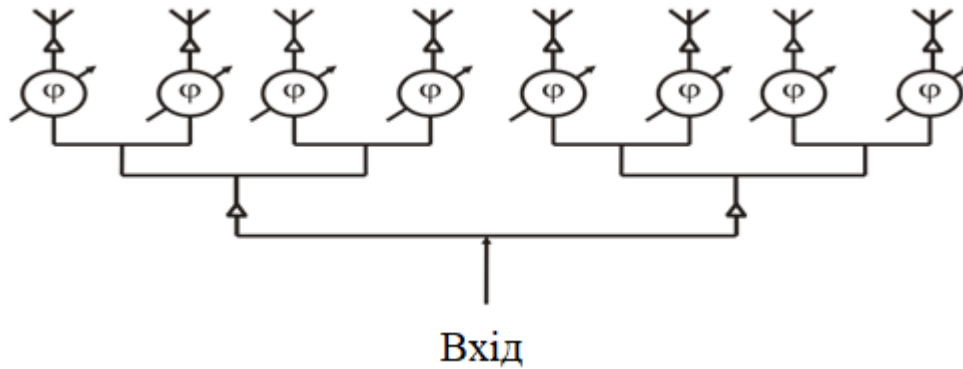


Рис.56 Активна фазованя антенна решітка

Для фазованих антенних решіток кутова ширина променю дорівнює:

$$\alpha \approx \sqrt{\lambda/Nd},$$

де  $N$  - кількість випромінюючих елементів,  $d$  – відстань між цими елементами,  $\lambda$  - довжина хвилі.

Звичайні ФАР реалізуються на основі електричних фазообертачів, які мають проблему з неточністю наведення антен, а тому обмежені для вузько-смугових операцій. Однак для багатьох додатків дуже бажано, щоб антени фазової матриці могли працювати в широкій смузі частот з формуванням вузьких діаграм спрямованості (від декількох градусів до частин одного градуса). В мобільних системах ММД 5G для кожного користувача планується утворення власної діаграми спрямованості (просторове розділення каналів). Ефективним розв'язанням таких завдань є використання формування діаграми спрямованості в режимі реального часу TTD (англ. True time delay). Модулі TTD певним чином встановлюють фазу радіосигналу, яка варіюється з частотою, в той час як фазообертачі є незалежними від частоти. Найбільшою проблемою в цих компонентах є масштабованість, оскільки кількість антенних елементів в масиві може обчислюватися сотнями. Більшість відомих у даний час методів формування випромінювання вимагають істотних обчислювальних потужностей і тривалого часу обробки. В прикладі, коли радіолокатор створений на базі ФАР, що складається з 1000 приймальних елементів, які працюють при миттєвій смузі 10 ГГц, де вимагається відношення сигнал/шум не менш 90 дБ, для чого необхідним є 15-розрядний процесор. Можна розрахувати, що для стробування на частоті Найквіста потрібно  $20 \times 10^9$  вибірок в секунду, та кожна вибірка повинна бути подана 15-розрядною цифровою послідовністю. В результаті сукупна швидкість передачі на антенну становить 300 Гбіт/с. Внаслідок того, що це фазована ґратка, вихідні сигнали усіх її 1000 елементів повинні бути оброблені когерентно, тобто повна швидкість даних, що потребують обробку, становить 300 Тбіт/с. Така швидкість, являє собою надзвичайно великий обсяг даних для управління та обробки, а також це вище сучасних технологічних можливостей. Аналогова обробка сигналів, або діаграмоутворення, можливо, будуть необхідні завжди,

оскільки системні вимоги по відношенню до збільшення динамічного діапазону, миттєвої смуги пропускання та розмірів ґратки можуть зростати з більшою швидкістю, ніж розвиток цифрової обробки сигналів.

Характерну схему активної фазованої антенної ґратки (АФАР) наведено на рис. 2.2 [21]. Вона містить модулі, які дискретно переналаштовуються в режимі реального часу (ТТД) та РЧ фазообертач.

З формули (2.1) випливає, що для формування вузьких діаграм спрямованості необхідне використання високочастотного випромінювання ММД. В цьому випадку у виразі (2.1) будуть присутні малі значення довжини хвилі та, відповідно, значення кута розкриття антени також будуть мати малі значення.

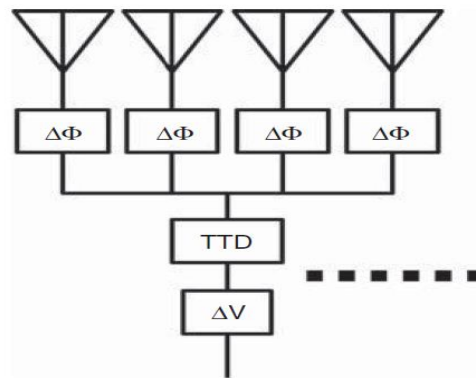


Рис. 57. Приклад сегменту АФАР з використанням модулів, які дискретно переналаштовуються в ТТД, фазообертачів ( $\Delta\Phi$ ) та регулювання амплітуди ( $\Delta V$ )

На рис. 58 показано два принципи керування радіопроменем. Як видно з рисунку 2.3,а, щоб направляти промінь під кутом  $\theta$  до нормалі до площі розкриття ФАР, потрібен фазовий зсув:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda} = 2\pi \frac{d \sin \alpha}{\lambda}$$

Звідси:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\Delta\varphi \lambda}{2\pi d} \quad )$$

Кут випромінювання  $\theta$  є функцією від довжини хвилі НВЧ випромінювання. Отже система формування променя з електричними фазообертачами може працювати тільки з використанням вузькосмугових сигналів. Така проблема може бути вирішена, якщо фазовий зсув здійснюється лінією затримки, як показано на рис. 58,б, де використовується лінія затримки з довжиною  $\Delta L = d \sin \theta$ . Напрямок променя задається формулою:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\Delta L}{d}$$

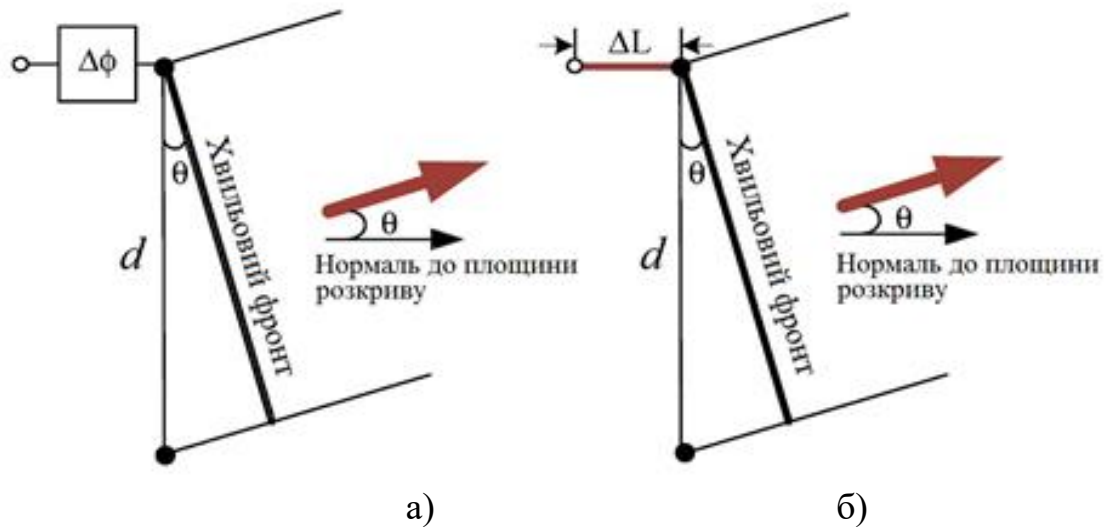


Рис. 58. Керування променем а) за допомогою фазообертача, б) з використанням лінії затримки

Він є незалежним від довжини хвилі (частоти) і ширини смуги сигналу. На рис. 59 наведено приклад діаграми спрямованості антени з шести елементів, розділених на відстань 1 см, що працюють на центральній частоті 15 ГГц з шириною смуги сигналу 10 ГГц, для звичайних електронних фазообертачів та фазообертачів, що використовують компонент затримки за часом.

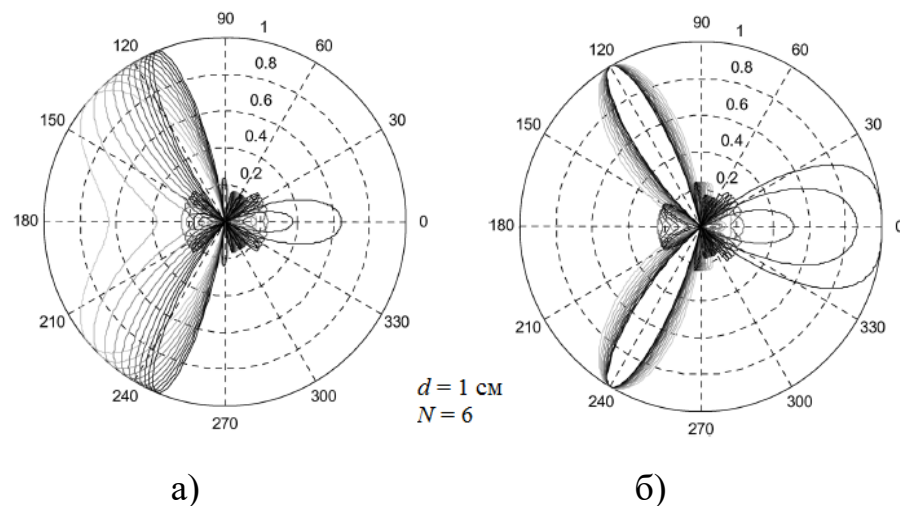


Рис. 59. Порівняння діаграм спрямованості АФАР на частоті 10-20 ГГц: а) з використанням електронних фазообертачів (неточність наведення, розширення діаграми спрямованості), б) з використанням компонентів з часовою затримкою

### Особливості діаграм спрямованості антен в зоні Френеля

Принцип Гюйгенса – Френеля дозволяє пояснити таке важливе явище як **дифракція**. Суть його полягає у тому, що фронт хвилі вважають нескінченною сукупністю уявних неспрямованих перевипромінювачів сферичних хвиль, які

у свою чергу створюють сукупну сферичну хвилю, але на нескінченно малій відстані.

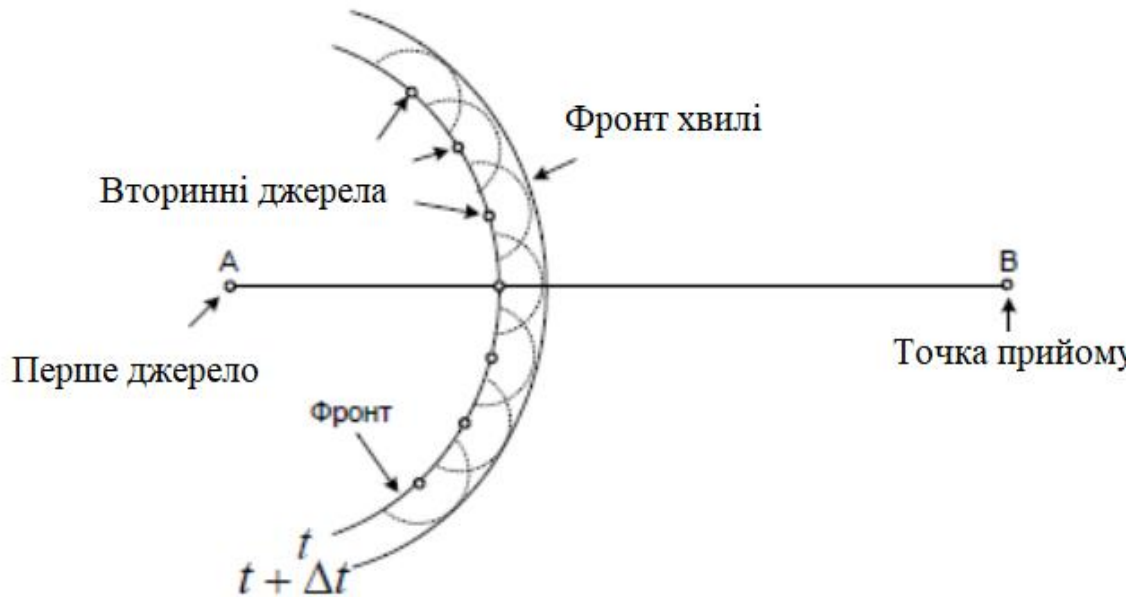


Рис.60. Принцип Гюйгенса – Френеля

І так крок за кроком, поки хвиля від джерела не діде до точки прийому. При цьому в точку прийому буде проходити не тільки хвиля, що перевипромінювалась вторинними джерелами, які знаходились на лінії, що з'єднує точку випромінювання (А) і точку прийому (В), а і хвилі від інших перевипромінювачів у межах фронту хвилі на відповідній відстані від джерела (приймача). У такому випадку всі ці хвилі будуть у точці прийому додаватися із своїми фазами та амплітудами, які зумовлені довжиною шляху (ламаної лінії)  $AM_n B$ , де  $M_n$  – точка на фронті хвилі, де знаходиться n-ий перевипромінювач (див. рис.61).

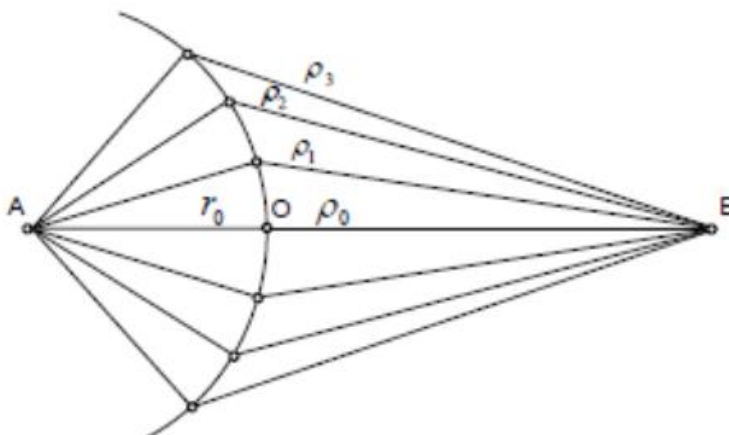


Рис.62. Принцип формування зон Френеля

Для певного n-того перевипромінювача цей шлях буде становити:

$$r_{\Sigma n} = (r_n + \rho_n) = (r_0 + \rho_0) + \lambda/2,$$

де:  $\lambda$  — довжина хвилі;  $r_0$  і  $\rho_0$  — відстані по прямій від точок В і А до фронту хвилі;

$r_n$  і  $\rho_n$  — відстані по ламаній лінії від точок В і А до фронту хвилі (до точки  $M_n$ ).

Зазначена хвиля і хвиля, що прийшла по прямій, при виконанні умови (1) додаватимуться у протифазі.

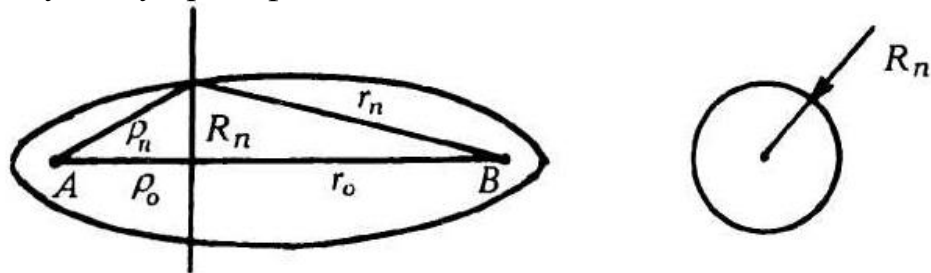


Рис. 63. Розрахунок зон Френеля

У межах кожної кільцевої області, що називається зоною Френеля, фаза плавно змінюється від деякого значення на її внутрішньому радіусі, зростаючи на величину  $\pi$  на зовнішньому радіусі.

Простір, у якому хвилі проходять до приймача шляхи включно від  $(r_0 + \rho_0)$  до  $(r_0 + \rho_0) + \lambda/2$  як з одного боку від АВ, так із іншого, звать першою зоною Френеля. Простір, у якому хвилі проходять до приймача шлях від  $(r_0 + \rho_0) + \lambda/2$  до  $(r_0 + \rho_0) + \lambda$  звать другою зоною Френеля і так далі.

Простір, у межах якого виконуються зазначені співвідношення, обмежений еліпсоїдом обертання. Це зумовлено тим, що, наприклад, перша зона Френеля при різних значеннях  $r_0$  і  $\rho_0$ , де виконується умова (1), є геометричним місцем точок, рівновіддалених від А та В. Таким геометричним місцем точок є еліпс. У фокусах цього еліпсу знаходяться передавач і приймач відповідно.

Радіуси зон Френеля - це радіуси еліпсоїдів. Для першої зони радіус дорівнює

$$R_{13\phi} = \sqrt{\frac{\lambda \rho_0 r_0}{(\rho_0 + r_0)}}.$$

Тут  $\lambda$  - довжина хвилі,  $r_0$  і  $\rho_0$  - відстані від кореспондуючих об'єктів до даного перетину області (рис.1). Оскільки завжди  $\lambda < r_0$  або  $\lambda < \rho_0$ , тобто область простору, суттєва для поширення хвиль, сильно витягнута уздовж лінії, що з'єднує кореспондуючі точки. Радіус n-ної зони

$$R_{n33} = \sqrt{\frac{n \lambda \rho_0 r_0}{(\rho_0 + r_0)}},$$

де  $n$  — номер зони.

В інженерній практиці існує поняття мінімальної зони - це центральна частина першої зони Френеля (коло), яка формує поле  $E = E_0$ . Діаметр мінімальної зони визначається виразом:

$$d_{\text{МІН}} = 0,578d_1, \quad (6.22)$$

де  $d_1$  - діаметр першої зони Френеля, який обчислюється за формулою (6.21) при  $n = 1$ . Межі мінімальної зони Френеля утворюють більш витягнутий еліпсоїд в порівнянні з еліпсоїдами, відповідними будь-якому іншого числа врахованих зон Френеля.

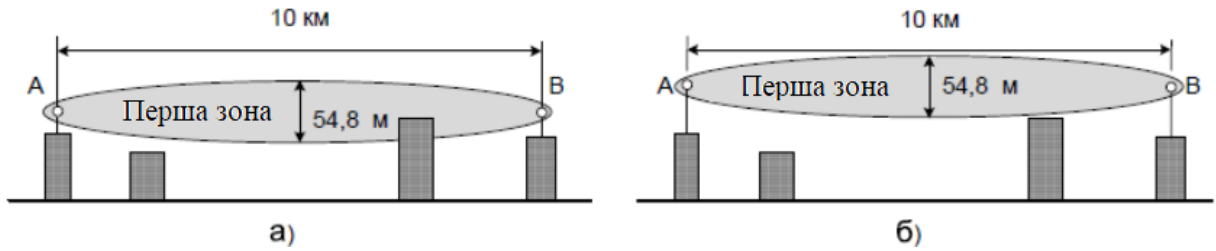


Рис. 64. Вибір висоти підвісу антен з урахуванням першої зона Френеля

## 11. ВПЛИВ АТМОСФЕРИ НА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Взагалі структура земної атмосфери та її фізичні властивості дуже складні (тиск, температура, хімічний склад, іонізація). Проте з точки зору поширення електромагнітних хвиль атмосфера Землі складається з трьох шарів з різними фізичними властивостями:

- тропосфера, висота до 10...12 км,
- стратосфера, висота 12...60 км - не впливає на поширення радіохвиль (РРХ),
- іоносфера, висота > 60 км, впливає сильно на радіохвилі різних діапазонів.

### Електричні властивості тропосфери

Це суміш газів: кисень  $O_2$  (21% за об'ємом), озон  $O_3$ , азот  $N_2$  (78%), вуглекислий газ  $CO_2$  (0,04%), пари води  $H_2O$  (0,2...2,5%) та деякі інші, яких порівняно мало.

У тропосфері міститься 80 % всієї земної атмосфери.

Загальним є те, що з висотою густина газів зменшується та змінюються електричні параметри атмосфери.

З висотою, через зменшення тиску, коефіцієнт заломлення  $n = \sqrt{\varepsilon}$  зменшується дуже повільно. У поверхні Землі за нормальних погодних умов коефіцієнт заломлення близький до одиниці,  $n = 1,000325$ . Зміна його вимірюється у тисячних та мільйонних долях.

Тому дуже зручно замість коефіцієнта заломлення  $n$  використовувати так званий індекс заломлення  $N = (n-1) \cdot 10^6$ . Біля поверхні Землі індекс заломлення  $N = 325$ . На рис.65 показано залежність індексу заломлення в атмосфері від висоти.

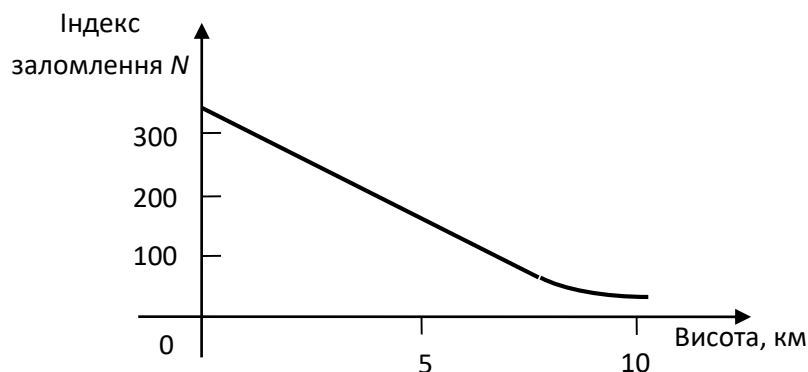


Рис.65. Залежність індексу заломлення в атмосфері від висоти

Індекс заломлення залежить від погоди, температури, пори року і може швидко змінюватися.

Як вплив земної тропосфери, на поширення радіохвиль також діють такі фактори, як дощ, туман, сніг, град (так звані гідрометеори, у яких відносна



діелектрична проникність  $\varepsilon_r > 1$ ). Їх наявність призводять до розсіювання радіохвиль та їх згасання.

### Радіохвилі у тропосфері.

Рефракція радіохвиль у тропосфері. Еквівалентний радіус Землі.

Відмінність коефіцієнту заломлення в тропосфері від 1 та його зміна з висотою відчутно впливає на поширення радіохвиль, особливо в УКХ діапазоні.

Розіб'ємо уявно тропосферу на тонкі шари, у межах кожного будемо наближено вважати показник заломлення постійним,  $n = const$ .

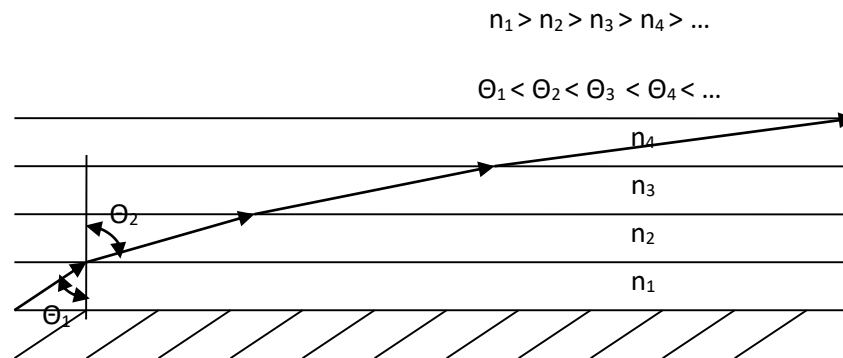


Рис. 66. Рефракція радіохвиль в тропосфері

На межі розподілу шарів діє другий закон Снеліуса:

$$n_1 \sin \Theta_1 = n_2 \sin \Theta_2.$$

Тому при  $n_1 > n_2$  буде  $\sin \Theta_1 < \sin \Theta_2$ .

Це означає, що при проходженні променя в менш щільні шари повітря промінь буде йти більш похило. Його траєкторія викривлюється.

Це явище має назву «рефракція».

В реальному середовищі, де коефіцієнт заломлення змінюється плавно, і траєкторія буде плавною кривою.

Можна показати, що радіус кривизни траєкторії променя у земній атмосфері визначається виразом

$$\rho = \frac{n}{\sin \Theta_0 \left( -\frac{dn}{dh} \right)}.$$

Звичайно  $\frac{dn}{dh} < 0$ , тому  $\rho > 0$ , і промінь викривляється в сторону Землі.

Особливий інтерес являє собою випадок горизонтального напрямлених променів, коли  $\sin \theta_0 = 1$ . У поверхні Землі  $n \approx 1$ . При типовій залежності показника заломлення від висоти (при нормальній рефракції)  $\frac{dn}{dh} = -4 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{км}}$ ,

звідки ми отримуємо радіус кривизни променя  $\rho = \frac{n}{-\frac{dn}{dh}} = 25000 \text{ км}$ .

Вплив тропосфери на траєкторію променів зручно враховувати введенням еквівалентного радіусу Землі. Якщо припустити, що промінь іде прямолінійно, то відстань між траєкторією прямого променя та поверхнею з еквівалентним радіусом буде така ж сама, як в реальності між викривленим променем та реальною земною поверхнею (рис.67).

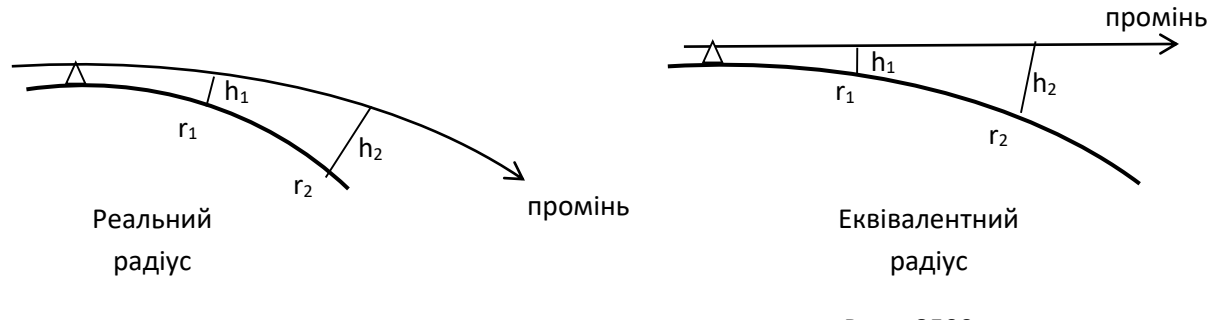


Рис. 67. Еквівалентний радіус Землі

Можна довести, що еквівалентний радіус Землі  $R_{екв} = \frac{R_0}{1 - \frac{R_0}{\rho}} = 8500 \text{ км}$ .

Висновки:

1. Значенням еквівалентного радіусу  $R_{екв} = 8500 \text{ км}$  можна користуватися при нормальній рефракції  $\frac{dn}{dh} = -4 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{км}}$ .

2. Дальність прямої видимості з урахуванням рефракції розраховується за формулою  $r_0 = \sqrt{2R_{екв}}(\sqrt{H} + \sqrt{h}) = 4,12(\sqrt{H} + \sqrt{h})_{\text{км}}$ , де висоту виражено в метрах.

3. У формулу для приведених висот при розрахунку напруженості електричного поля підставляють еквівалентний радіус Землі:  $h_E = h - \frac{r^2}{2R_{екв}}$ .

### 9.2.2. Поглинання радіохвиль в тропосфері

Послаблення в тропосфері практично відчують тільки радіохвилі дециметрового та більш коротких діапазонів.

Причина поглинання радіохвиль: часткове перетворення електромагнітної енергії у інші види енергії та розсіювання в інші боки на гідро метеорах.

Коефіцієнт послаблення вимірюють в децибелах:

$$\Gamma'_{зв} = 20 \lg \frac{E_0}{E_m} \frac{\partial \delta}{\text{км}},$$

де  $E_0$  - напруженість поля у вільному просторі без згасання,

$E_m$  - напруженість поля в реальній тропосфері.

Залежність коефіцієнта послаблення  $\Gamma$  від інтенсивності дощу і туману показана на рис. 68:

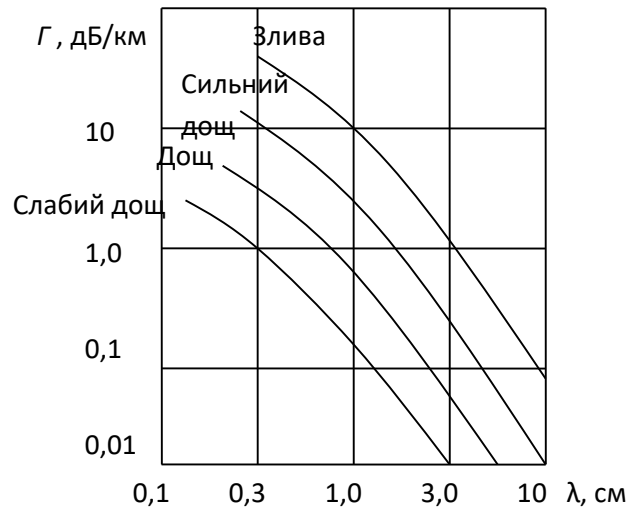


Рис. 68. Згасання радіохвиль в дощі

Висновки:

1. Дані про поглинання перевіряються експериментально.
2. Поглинання різко зменшується зі збільшенням довжини хвилі.
3. При довжині хвилі  $\lambda > 10\text{ см}$  поглинанням у дощі, тумані, граді, у снігу можна знехтувати.

Міліметрові хвилі зазнають додаткового розсіювання і поглинання на молекулах води, кисню .

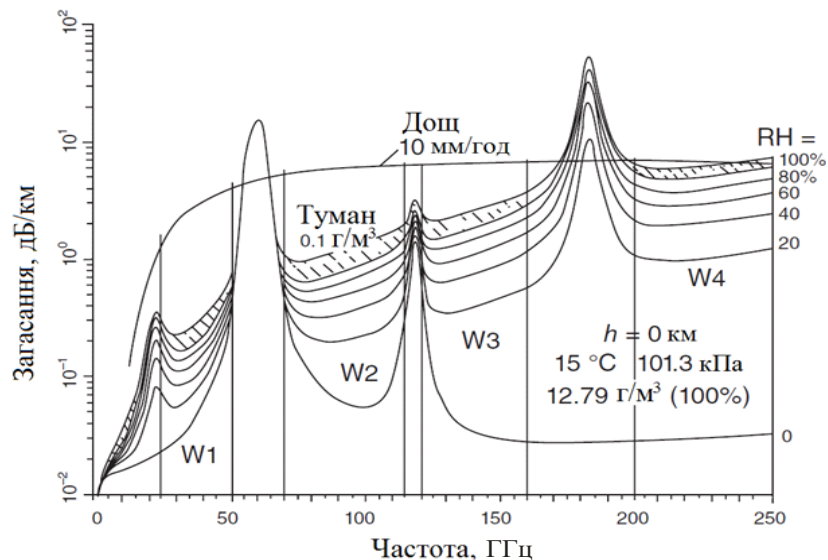


Рис. 69. Атмосферне згасання на рівні моря для різних рівнів вологості (RH), (з туманом та дощем включно) для міліметрового діапазону хвиль, W1-W4 – вікна прозорості атмосфери

Залежність згасання міліметрових хвиль від довжини хвилі суттєво резонансна. Існують максимуми поглинання:

- на молекулах кисню це 0,25 см; 0,5 см;
- на молекулах води це  $\lambda = 1,3$  см.

Проте існують і вікна прозорості:  $\lambda = 0,3$  см; 0,8 см;  $>2$  см.

Можливо зробити висновок, що міліметрові хвилі можна використовувати у хорошу погоду, на невеликій відстані (кілька кілометрів), та треба уважно обрати довжину хвилі, щоб потрапити у вікно прозорості.

### Радіохвилі у іоносфері. Відбивання радіохвиль від іоносфери

Електричні параметри іоносфери

В іоносфері спостерігається значна концентрація вільних електронів і іонів.

Причина іонізації: сонячне опромінення, космічні промені, ультрафіолетове і корпускулярне опромінювання.

Експериментально отримана залежність концентрації вільних іонів вдень та вночі, яка наведена на рис. 70

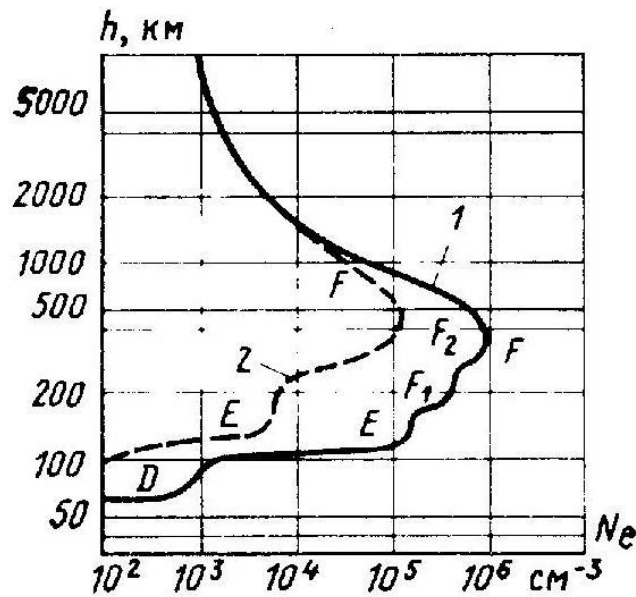


Рис. 70. Залежність концентрації вільних іонів в іоносфері від висоти:  
1- вдень, 2- вночі.

Вплив іоносфери на радіохвилі проявляється у наступному:

- відбивання хвиль від іоносфери,
- згасання хвиль у іоносфері,
- проходження радіохвиль через іоносферу в космос.

Для радіохвиль різних діапазонів цей вплив різний.

Іоносфера – це плазма, її діелектрична проникність залежить від частоти. Можна показати, що коефіцієнт заломлення плазми розраховується за формулою

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} = \sqrt{1 - 80,6 \frac{N}{f^2}},$$

де  $N$  – концентрація вільних носіїв заряду (іонів та електронів);  
 $f$  – частота хвилі.

При збільшенні висоти над земною поверхнею, як видно з рис.6, зростає концентрація вільних носіїв заряду  $N$ . Важливо, що характер залежності показника заломлення від концентрації носіїв заряду залежить від частоти.

Якщо частота велика, другий доданок у формулі (9.1) дуже малий, тому показник заломлення зменшується дуже повільно при збільшенні концентрації носіїв. Ультракороткі хвилі характеризуються практично незмінним показником заломлення, траєкторія променів не викривлюється. УКХ проходять у космос.

Якщо частота мала, другий доданок у формулі ( $n = \sqrt{\varepsilon_r} = \sqrt{1 - 80,6 \frac{N}{f^2}}$ ) великий, тому при збільшенні висоти над поверхнею і збільшенні концентрації носіїв спостерігається швидке зменшення показника заломлення. Внаслідок сказаного, для довгих хвиль відбувається сильне викривлення траєкторії променів і, в результаті, відбивання хвиль від нижніх шарів іоносфери. Середні та короткі хвилі відбиваються від шарів, які мають більшу концентрацію іонів.

Траєкторія променів у іоносфері суттєво залежить від діапазону хвиль, як показано на рис.71.

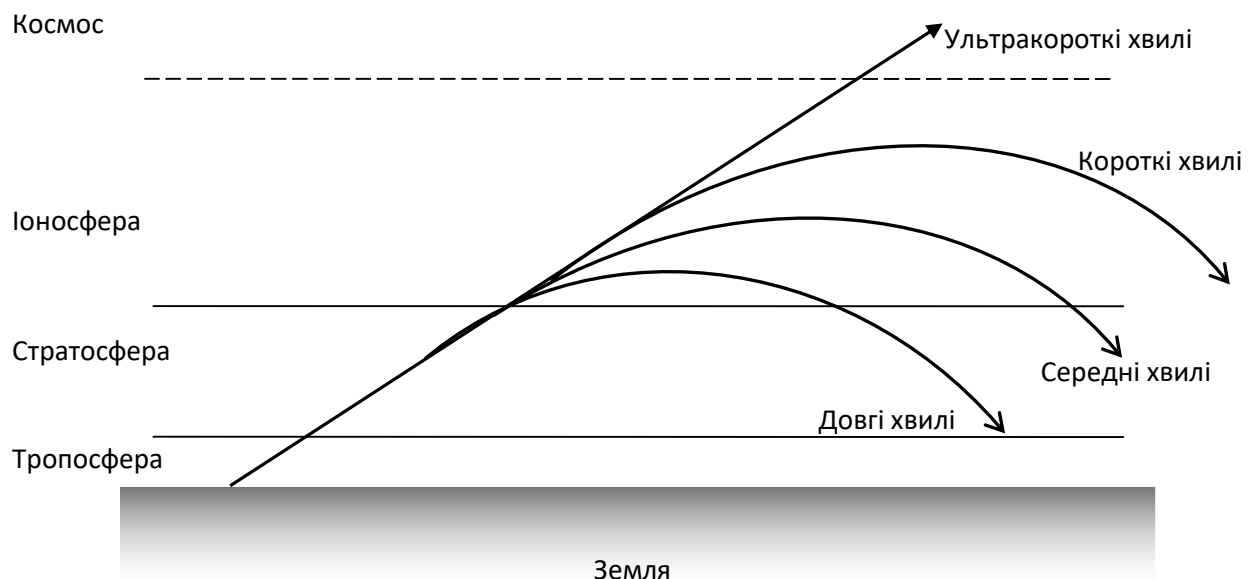


Рис. 71. Траєкторії променів різних діапазонів в іоносфері

### Діапазонні особливості поширення радіохвиль

Довгі хвилі,  $\lambda > 1000\text{ м}$

Довгі хвилі відбиваються від нижніх шарів іоносфери як вдень, так і вночі. Вони відбиваються і від Землі, яка для хвиль цього діапазону є провідником. Тому при поширенні хвиль цього діапазону існують так звані

поверхнева (вдовж Земної поверхні) і просторова (відбита від іоносфери) хвилі, у хвилеводі між Землею та іоносферою. Хвилі цього діапазону можуть проходити тисячі кілометрів.

В результаті радіозв'язок можливий на сотні та тисячі кілометрів.

Недолік використання довгих хвиль: мала смуга частот, необхідні великі антени.

Середні хвилі,  $100\text{ м} < \lambda < 1000\text{ м}$

Ці хвилі вже доволі сильно поглинаються у ґрунті, тому поверхнева хвиля згасає значно швидше, ніж у довгих хвиль.

Відбивання від іоносфери суттєво залежить від часу дня. Іоносферна хвиля може відбитися тільки від шару Е з великою концентрацією іонів. Тому вдень хвиля згасає у нижчому шарі Д, поки пройде до шару Е. Вночі цього шару немає, згасання у шарі Д немає, хвиля проходить до шару Е та відбивається від нього.

В результаті зв'язок на середніх хвилях можливий за допомогою іоносферної хвилі тільки вночі, на відстань до кілька сотень кілометрів

Короткі хвилі  $10\text{ м} < \lambda < 100\text{ м}$

Земна хвиля сильно поглинається – відстань поширення поверхневої хвилі кілька десятків кілометрів. Короткі хвилі можуть відбиватися від шару F іоносфери.

Максимально застосовна частота обмежена умовою відбивання від іоносфери.

Вдень – концентрація іонів більша, можна використовувати великі частоти, вони відіб'ються та повернуться на Землю. Вночі іонів менше, високі частоти ідуть у космос і не відбиваються. Використовують нижчі частоти.

Мінімальна застосовна частота - визначається згасанням в іоносфері.

Оптимальна частота на 10-30 % нижча за максимальну застосовну частоту.

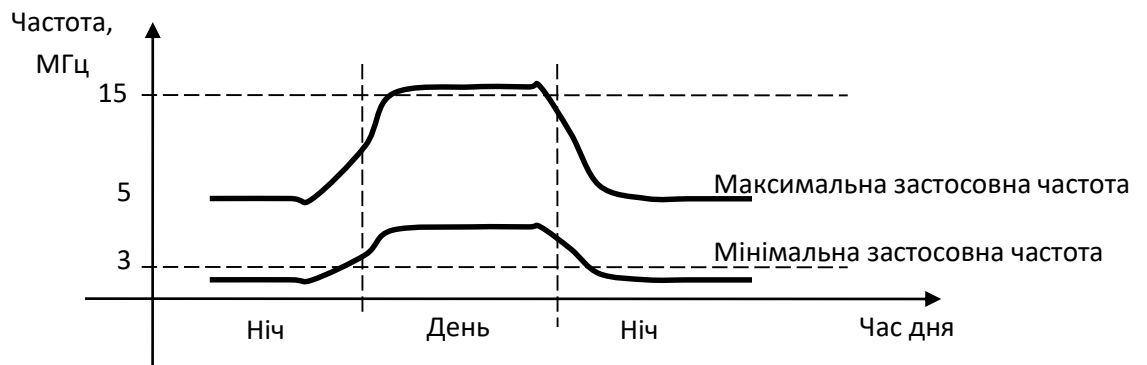


Рис.72. Максимальна та мінімальна застосовні частоти короткохвильового діапазону

Вночі використовують низькочастотну частину короткохвильового діапазону. Вдень - високочастотну частину короткохвильового діапазону.  
Дальність короткохвильового зв'язку складає сотні і тисячі км.

Ультракороткі хвилі,  $\lambda < 10\text{ м}$

Всі ультракороткі хвилі об'єднує те, що вони проходять через іоносферу і не відбиваються, не повертаються до Землі. У цьому діапазоні можливий зв'язок тільки у межах прямої видимості, наприклад зі супутниками (супутникове телебачення, космічні апарати), в радіорелейних лініях передачі тощо.

Рефракція УКХ слабка.

Є виключення із цього правила зв'язку. Зв'язок можливий завдяки відбиванню хвиль:

- від неоднорідностей іоносфери (що викликані метеоритними потоками),
  - від шару E<sub>s</sub> з високою іонізацією, що тимчасово з'являється під час високої сонячної активності. Тоді зв'язок можливий на метрових хвилях.
  - внаслідок надрефракції, зв'язок можливий на відстань до 1000 км.
- Дециметрові хвилі не відбиваються від іоносфери.  
Сантиметрові хвилі сильно згасають в гідрометеорах.

## 12. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

### 1. Часове представлення сигналів

Сигналом називають мінливу в часі фізичну величину (звукова хвиля, інтенсивність електричного поля і т.д.), що відображає повідомлення в процесі його передачі. Кажуть, що повідомлення або відповідний йому сигнал створюється джерелом повідомлення або сигналу.

Форма подання інформації називається повідомленням. Приклади повідомлень: текст телеграми, мова, музика, фото, TV - зображення, дані на виході ЕОМ, команди управління і т.д.

Для того, щоб повідомлення можна було передати одержувачу, необхідно скористатися деяким фізичним процесом, здатним з тією чи іншою швидкістю поширюватися від джерела до одержувача повідомлення.

Сигнали як фізичні процеси можна вивчати за допомогою різних приладів і пристроїв - осцилографів, вольтметрів, приймачів. Такий емпіричний метод має істотний недолік. Явища, що спостерігаються експериментатором, завжди виступають як окремі, поодинокі прояви, позбавлені тієї ступеня узагальненості, яка дозволила б судити про їх фундаментальні властивості, передбачати результати в умовах, що змінилися.

Для того щоб зробити сигнали об'єктами теоретичного вивчення і розрахунків, слід вказати спосіб їх математичного опису або створити математичну модель досліджуваного сигналу.

Математичною моделлю сигналу може бути, наприклад, функціональна залежність, аргументом якої є час. Як правило, такі математичні моделі сигналів позначається символами латинського алфавіту  $s(t)$ ,  $u(t)$ ,  $f(t)$  і т. д. Визначивши так чи інакше дану функцію, визначаємо і сигнал (рис. 2.1).

Часто в теорії сигналів використовується тригонометрична функція  $\cos(t)$  для опису гармонічного сигналу. Записується вона так

$$u(t) = U \cos(\omega t + \varphi),$$

де  $U$  - амплітуда,

$\omega$  - кутова (циклічна) частота коливання,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 1/T$  - лінійна частота коливання,  $T$  - період коливань;

$t$  - час,

$\varphi$  - початкова фаза.

Графік цього сигналу поданий на рис.74

#### Деякі види сигналів

**Детерміновані і випадкові сигнали.** Якщо математична модель сигналу дозволяє здійснити пророкування миттєвих значень сигналу в будь-які моменти часу, то сигнал називається детермінованим. Способи його завдання можуть бути різноманітними - математична формула, обчислювальний алгоритм або словесний опис.

Строго кажучи, детермінованих сигналів, так само як і відповідальних їм детермінованих процесів, не існує. Неминуча взаємодія системи з оточуючими її фізичними об'єктами, наявність хаотичних теплових флуктуацій і просто неповнота знань про початковий стан системи все це змушує розглядати реальні сигнали як випадкові функції часу.

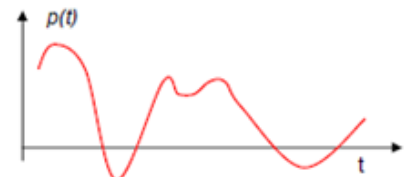


Рис. 73 Часове представлення сигналу

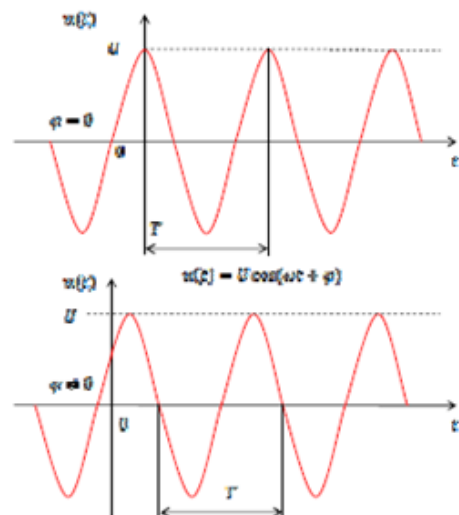
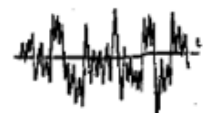


Рис. 74 Гармонічний сигнал





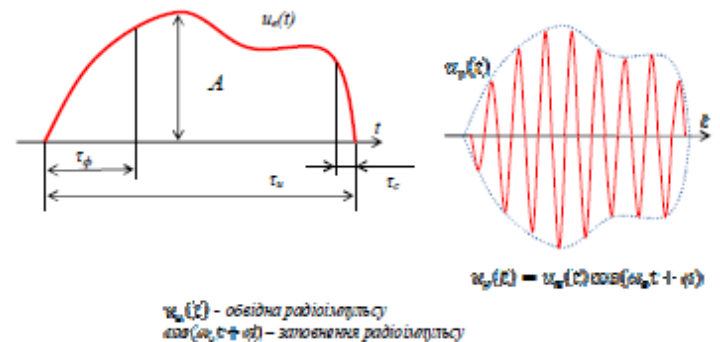
У радіотехніці випадкові сигнали часто проявляють себе як перешкоди, що перешкоджають вилученню інформації з прийнятого коливання. Проблема боротьби з перешкодами, підвищення завадостійкості радіоприйому одна з центральних проблем радіотехніки.

Може здатися, що поняття «випадковий сигнал» суперечливо. Однак це не так. Наприклад, сигнал на виході приймача радіотелескопу, спрямованого на джерело космічного випромінювання, являють собою хаотичні коливання, що несуть, проте, різноманітну інформацію про природний об'єкт.

Між детермінованими і випадковими сигналами немає непереборного кордону.

**Безперервні і імпульсні сигнали.** Безперервні сигнали - це коливання або процеси, що існують на всьому проміжку часу спостереження. До них також відносять і імпульси, тобто коливання (фізичні процеси), що існують лише в межах кінцевого відрізка часу. При цьому розрізняють відеоімпульси і радіоімпульси.

Різниця між цими двома основними видами імпульсів полягає в наступному. Якщо  $u_e(t)$  - відеоімпульс, то відповідний йому радіоімпульс  $u_p(t) = u_e(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ . При цьому функція  $u_e(t)$  називається обвідною радіоімпульсу, а функція  $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  його заповненням.



$u_e(t)$  - обвідна радіоімпульсу  
 $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  - заповнення радіоімпульсу

Рис. 75 Гармонічний сигнал

Походження терміну «відеоімпульс» пов'язане з тим, що вперше такі коливання стали застосовуватися в техніці телебачення.

У технічних розрахунках замість повної математичної моделі, яка враховує подробиці «тонкої структури» імпульсу, часто користуються числовими параметрами, що дають спрощене уявлення про його форму. Так, для відеоімпульсу, близького за формою до трапеції, прийнято визначати його амплітуду (висоту)  $A$ . З часових параметрів вказують тривалість імпульсу  $\tau$ , тривалість фронту  $\tau_\phi$  і тривалість зрізу  $\tau_c$ .

У радіотехніці мають справу з імпульсами напруги, амплітуди яких лежать в межах від часток мікрвольта до декількох кіловольт, а тривалості досягають частки наносекунди.

## 2. Спектральне представлення сигналів

Повне визначення сигналу не завжди потрібно. Достатнім є опис у вигляді декількох параметрів, що характеризують основні властивості сигналу з точки зору його передачі.

Широко використовується не тільки часове уявлення сигналів, а й спектральне. Якщо який-небудь сигнал представлений у вигляді суми гармонійних коливань (функції  $\cos(x)$  і  $\sin(x)$ ) з різними частотами, то говорять, що здійснено спектральне розкладання цього сигналу. Окремі гармонійні компоненти сигналу утворюють його спектр.

Згадаймо розкладання в спектр білого світла.

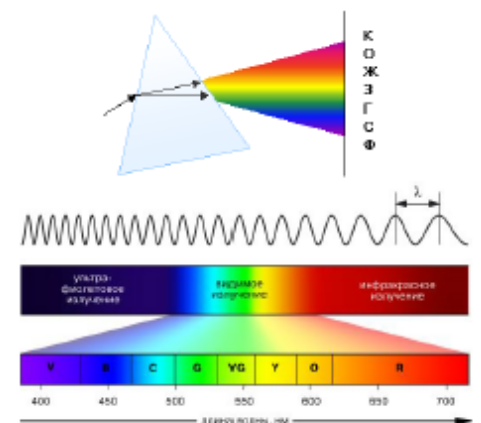


Рис. 76 Спектр білого світла

Будь періодичний процес можна представити у вигляді суми гармонійних коливань різних частот, різних амплітуд і різних початкових фаз (рис. 77). Кожне гармонійне коливання з цієї суми називається також гармонікою, а набір всіх гармонік називають спектральним розкладанням досліджуваного сигналу.

При великому числі гармонійних складових, показане на рис. зображення стає громіздким. Кожна гармоніка спектра характеризується

- амплітудою,
- частотою і
- початковою фазою.

Це дозволяє використовувати графічне зображення спектра сигналу у вигляді амплітудного (АЧС) і фазочастотних (ФЧС) спектрів, показаних на рис.

Рис. 78 а) зображує залежність амплітуд складових спектра від частоти, тобто амплітудно-частотний спектр (АЧС), або амплітудний спектр. Рис. 78 б) зображує залежність початкових фаз складових від частоти, тобто фазо-частотний спектр (ФЧС), або скорочено - фазовий спектр.

На рис.79 показана апроксимація сигналу типу "меандр" його першими трьома спектральними складовими.

Неперіодичні сигнали можна представити у вигляді інтеграла (безперервної суми) гармонійних сигналів із безперервним спектром частот. Тобто сигнал неперіодичний в часі розкладається на безперервну і нескінченну кількість гармонік. Наприклад, спектральне розкладання ідеального імпульсу (одиничної потужності і нульової тривалості) має складові всього спектру частот, від  $-\infty$  до  $+\infty$  (рис. 80).

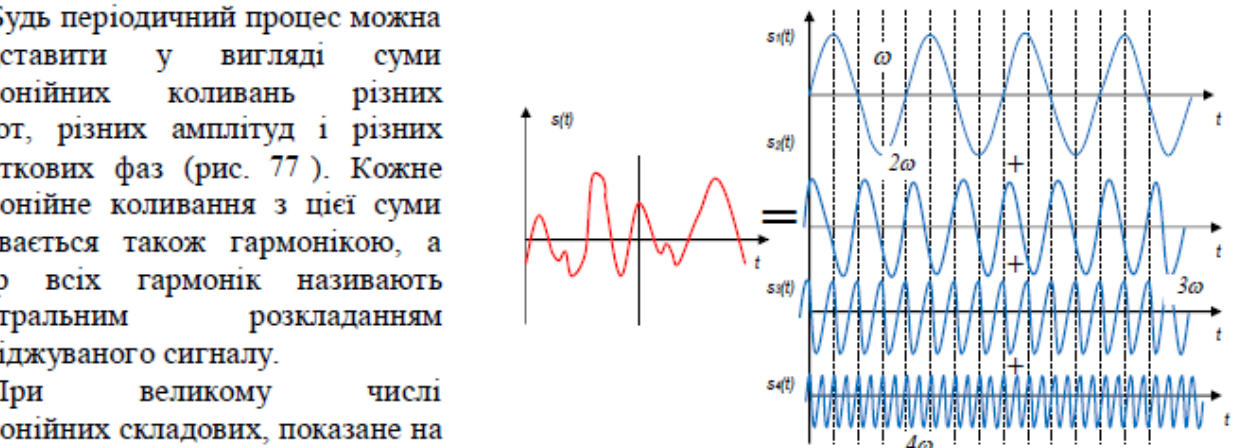


Рис. 77 Періодичний процес у вигляді суми гармонійних коливань різних частот, різних амплітуд і різних початкових фаз

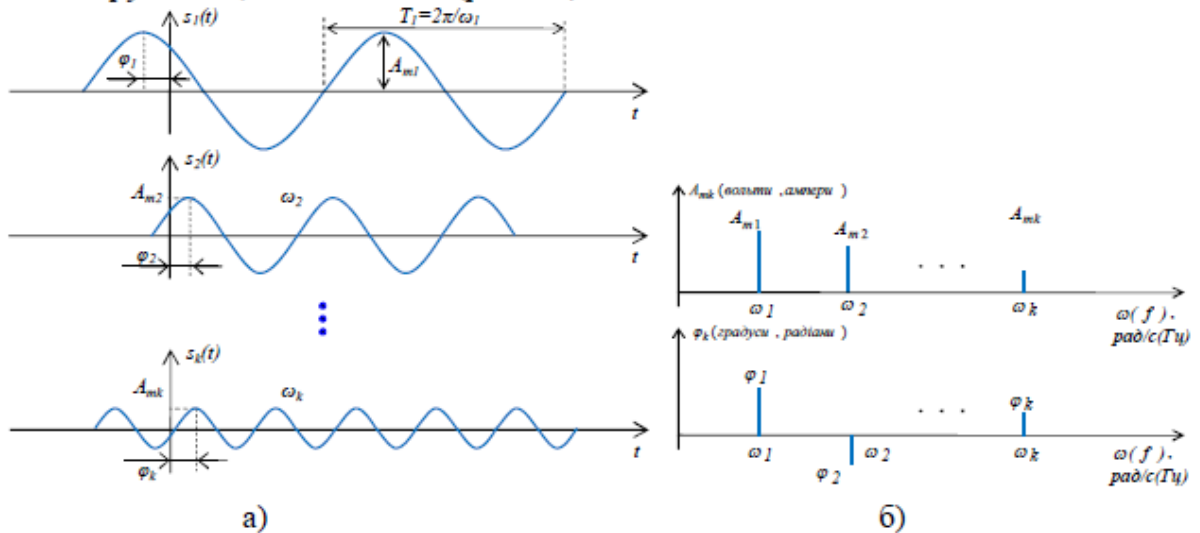


Рис. 78 . Зображення спектрів сигналу

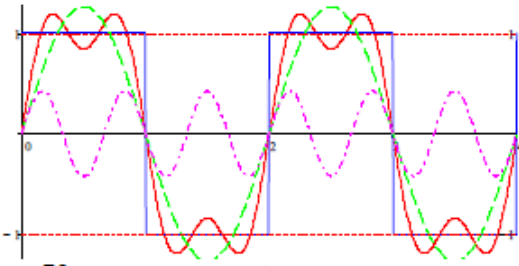


Рис. 79 Апроксимація сигналу типу "меандр" його першими трьома спектральними складовими.

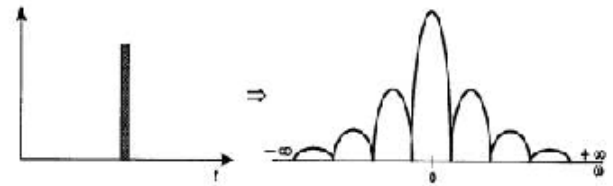


Рис. 80 Спектральне розкладання ідеального імпульсу

$S(\omega)$  – це модуль спектральної щільності сигналу  $s(t)$ , за яким можна визначити амплітуди гармонійних складових спектру сигналу.

**Ширина спектра сигналу.** При використанні частотного представлення сигналу часто оперують терміном **ширина спектру сигналу**. Що це таке?

Цим параметром намагаються оцінити інтервал частот гармонік, які входять в спектр сигналу  $f_{max} - f_{min} = \Delta$ .

Тут існує деяка проблема - для реальних сигналів, кінцевих в часі, спектр є нескінченним, тобто  $f_{max} \rightarrow +\infty$ ,  $f_{min} \rightarrow -\infty$  і  $\Delta \rightarrow \infty$ . Тоді що оцінюють?

Справа в тому, що у більшості використовуваних сигналів амплітуди гармонік у спектрі зменшуються із зростанням їх частоти, тому можна обмежити розгляд спектру сигналу тільки тими гармоніками, у яких амплітуди досить великі, тобто визначити ті самі  $f_{max}$  і  $f_{min}$ , які дозволять оцінити ширину спектра.

**Децибелі.** Інтенсивність сигналів часто оцінюється у децибелах (дБ). Децибелом (дБ) називається міра відносини між двома рівнями (потужностями) сигналу:

$$L[\text{дБ}] = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2},$$

де,  $U_1, U_2$  - рівні сигналів ;

$P_1, P_2$ , - потужності сигналів

Степенева функція -  $y = a^x$ ,  $y = 10^x$ ,  $y = 2^x$ . Логарифмічна функція зворотна степеневій -  $x = \log_a y$ ,  $x = \log_{10} y = \lg y$ ,  $x = \log_2(y)$

Децибелі показують, у скільки разів одна величина більше (менше) іншої у логарифмічному масштабі. Зв'язок між значеннями в децибелах і ступенями числа 10 показана в табл.

Таблиця Значення у децибелах

відношення потужностей	дБ	відношення потужностей	дБ
$10^1$	10	$10^{-1}$	-10
$10^2$	20	$10^{-2}$	-20
$10^3$	30	$10^{-3}$	-30
$10^4$	40	$10^{-4}$	-40
$10^5$	50	$10^{-5}$	-50
$10^6$	60	$10^{-6}$	-60

Переведення відносини потужностей у дБ

$P_1/P_0$	10000	100	10	$\approx 4$	$\approx 2$	$\approx 1.26$	1	$\approx 0.79$	$\approx 0.5$	$\approx 0.25$	0.1	0.01	0.0001
$L_{\text{дБ}}$	40	20	10	6	3	1	0	-1	-3	-6	-10	-20	-40

Децибел служить для визначення відносини двох величин. Але немає нічого дивного в тому, що децибел використовують і для вимірювання абсолютних значень. Для цього достатньо домовитися, який рівень вимірюваної фізичної величини буде прийнятий за опорний рівень (умовний 0 дБ).

Строго кажучи, має бути однозначно визначено, яка саме фізична величина і яке саме її значення використовуються в якості опорного рівня. Опорний рівень вказується у вигляді добавки, наступної за символами « дБ » (наприклад, дБм), або опорний рівень повинен бути ясний з контексту (наприклад, « дБ відносно 1 мВт »).

На практиці поширені такі опорні рівні і спеціальні позначення для них:

- dVm (російське дБм) - опорний рівень - це потужність в 1 мВт. Наприклад, «вихідна потужність підсилювального каскаду становить 13 дБм» (тобто потужність, що виділяється на номінальній для цього підсилювального каскаду навантаженні, становить 20 мВт).
- dBV (російське дБВ) - опорна напруга 1 В на номінальному навантаженні (для побутової техніки - зазвичай 47 кОм); наприклад, стандартизований рівень сигналу для побутового аудіообладнання становить -10 дБВ, тобто 0,316 В на навантаженні 47 кОм.

### Висновки

Інформація сприймається, обробляється, передається і зберігається у вигляді сигналів.

Сигналом називають мінливу в часі фізичну величину (звукова хвиля, інтенсивність електричного поля і т.д.), що відображає повідомлення в процесі його передачі.

Математичною моделлю сигналу може бути, наприклад, функціональна залежність, аргументом якої є час. Як правило, такі математичні моделі сигналів позначаються символами латинського алфавіту  $s(t)$ ,  $u(t)$ ,  $f(t)$  і т. д.

Широко використовується не тільки часове уявлення сигналів, а й спектральне.

Якщо який-небудь сигнал представлений у вигляді суми гармонійних коливань (функції  $\cos(x)$  і  $\sin(x)$ ) з різними частотами, то говорять, що здійснено спектральне розкладання цього сигналу. Окремі гармонійні компоненти сигналу утворюють його спектр.

Інтенсивність сигналів часто оцінюється у децибелах (дБ). Децибелом (дБ) називається міра відносини між двома рівнями (потужностями) сигналу

### Контрольні питання

1. Математична модель сигналу.
2. Гармонійний сигнал.
3. Види сигналів.
4. Спектр періодичного сигналу.
5. Спектр неперіодичного сигналу.
6. Ширина спектра сигналу.
7. Поняття децибелів.

### 13. МОДУЛЯЦІЯ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

#### Вступ

Сигнали, що надходять від джерела повідомлень, як правило, не можуть бути безпосередньо передані по радіоканалу. Щоб здійснити ефективну передачу сигналів в якому-небудь середовищі, необхідно здійснити модуляцію.

У широкому сенсі модуляція - це перенесення інформації на фізичний процес-носіє, який може розповсюджуватися у середовищі. У перекладі з латинської "модуляція" - це мірність.

У техніці носієм інформації є фізичний сигнал, наприклад струм або напруга. У теорії розглядають математичну модель сигналу-носія. У загальному випадку це деяка функція часу  $f_n(t, a_1, a_2, \dots, a_n)$ , де  $a_1, a_2, \dots, a_n$  - параметри носія.

Найпростіший носій - це постійна величина, характеризується тільки одним параметром "a" (рис.81, а). Інформація тут може бути відображена зміною параметра "a" (рис. 81, б)). Цей процес відображення називають прямою модуляцією. У результаті прямої модуляції отримують сигнал, що несе інформацію.

Пряма модуляція характерна для етапу сприйняття інформації. Її здійснюють первинні вимірювальні перетворювачі і різні датчики.

Прямую модуляцію зазвичай не розглядають. Вважають, що вихідною інформацією є сигнал  $f(t)$ . Далі вирішують задачу: шляхом модуляції нанести цю інформацію на носій  $f_n(t, a_1, a_2, \dots, a_n)$ . Для цього за допомогою сигналу  $f(t)$  змінюють один або кілька параметрів носія. У результаті, наприклад, маємо:

- $f_n(t, a_1, a_2 + \Delta a_2(t), \dots, a_n)$  - модульований сигнал;
- $\Delta a_2(t) = kf(t)$  - змінна складова параметра;
- $f(t)$  - модулюючий сигнал (інформаційний).

Таким чином, у вузькому сенсі модуляція - це зміна одного або декількох параметрів носія за допомогою сигналу, що несе інформацію або модуляція - це фізичний процес управління параметрами несучого коливання. Зворотна операція, тобто виділення інформаційного сигналу з модульованого сигналу, називається демодуляцією.

Найбільшого поширення набули два види носіїв:

- 1) синусоїдальне коливання;
- 2) послідовність прямокутних імпульсів.

Залежно від цього розрізняють безперервну і імпульсну модуляції.

#### 1. Амплітудна модуляція

Гармонійний сигнал (рис. 82) описується функцією виду

$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

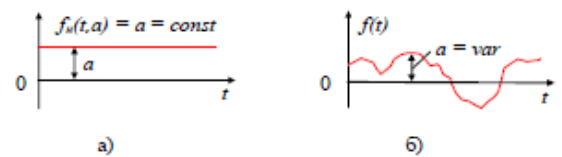


Рис. 81. Пряма модуляція

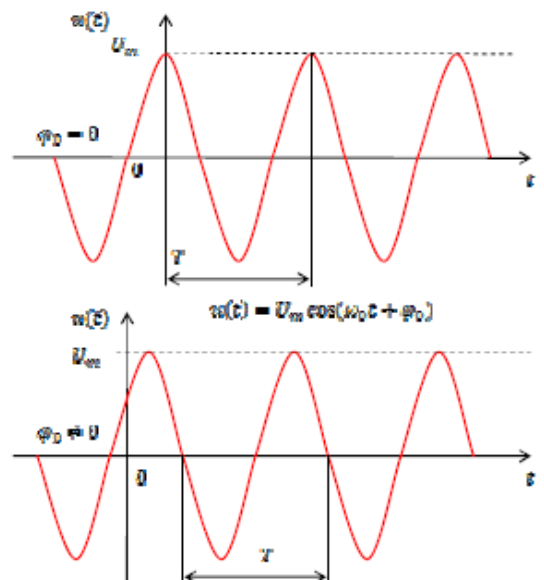


Рис. 82. Гармонійний сигнал

де  $U_m$  - амплітуда,  
 $\omega_0 = 2\pi f_0$  - кутова (циклічна) частота коливання,  $f_0 = \frac{1}{T}$  - лінійна частота коливання,  $T$  - період коливань;  
 $t$  - час,  
 $\varphi_0$  - початкова фаза.

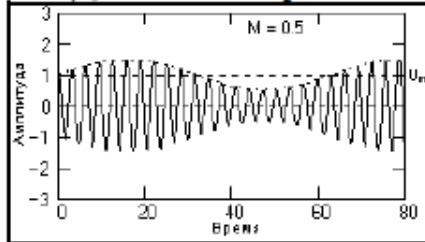


Рис. 83 Амплітудна модуляція

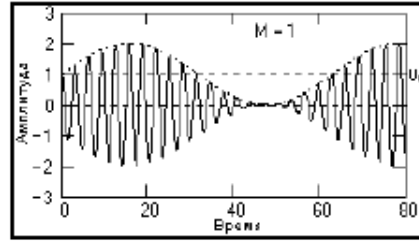


Рис. 84 Глибока амплітудна модуляція

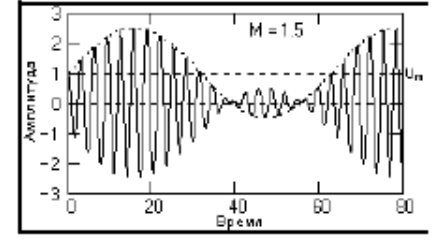


Рис. 85 Перемодуляція

У радіотехніці широкого поширення набули системи модуляції, які використовують в якості несучого просте гармонійне коливання  $u_{\text{нес}}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ , у якого є три постійних параметра  $U_m$ ,  $\omega_0$  і  $\varphi_0$ .

Змінюючи в часі той чи інший параметр, можна отримувати різні види модуляції.

Амплітудна модуляція (amplitude modulation, АМ) історично була першим видом модуляції, освоєним на практиці. В даний час АМ застосовується в основному тільки для радіомовлення на порівняно низьких частотах (не вище коротких хвиль) і для передачі зображення в аналоговому телевізійному мовленні.

АМ відповідає переносу інформації  $s(t) \Rightarrow U(t)$  при постійних значеннях параметрів несучої частоти  $\omega$  і фази  $\varphi$ . АМ - сигнал являє собою здобуток інформаційної обвідної  $U(t)$  і гармонійного коливання її заповнення з більш високими частотами. Форма запису амплітудно-модульованого сигналу:

$$u(t) = U(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$U(t) = U_m [1 + M \cdot s(t)],$$

де  $U_m$  - постійна амплітуда несучого коливання за відсутності вхідного (модулюючого) сигналу  $s(t)$ ,  $M$  - коефіцієнт амплітудної модуляції.

Значення  $M$  характеризує глибину амплітудної модуляції.

У простому випадку, якщо модулюючий сигнал представлений одночастотним гармонійним коливанням

$$s(t) = S_0 \cos(\Omega t)$$

з амплітудою  $S_0$  і частотою  $\Omega$ , то коефіцієнт модуляції дорівнює відношенню амплітуд модулюючого і несучого коливання

$$M = \frac{S_0}{U_m}$$

Значення  $M$  має перебувати в межах від 0 до 1 для всіх гармонік модулюючого сигналу. При значенні  $M < 1$  форма обвідної несучого коливання повністю повторює форму модулюючого сигналу  $s(t)$ , що можна бачити на рис. 83. Малу глибину модуляції  $M \ll 1$  для основних гармонік модулюючого сигналу застосовувати недоцільно, тому при цьому потужність переданого інформаційного сигналу буде багато менше потужності несучого коливання і потужність передавача буде використовуватися неефективно.

На рис. наведено приклад так званої глибокої модуляції, при якій значення  $M$  прагне 1 в екстремальних точках функції  $s(t)$ .

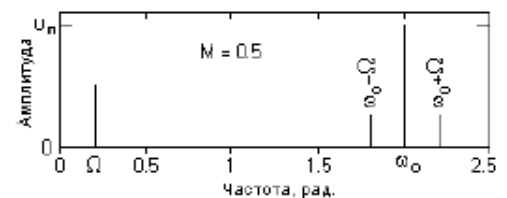


Рис. 86 Фізичні спектри сигналів

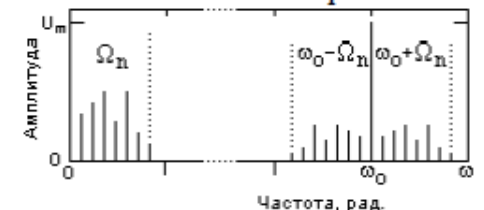


Рис. 87 Багатотональна амплітудна модуляція

При  $M > 1$  виникає так звана перемодуляція, приклад якої наведено на рис.85

Форма огинаючої при перемодуляції спотворюється щодо форми модулюючого сигналу, і після демодуляції, якщо застосовуються її найпростіші методи, інформація може бути перекручена.

Фізичні спектри модулюючого сигналу і модульованого сигналу показані на рис. 86

Звідки випливає, що модулююче коливання з частотою  $\Omega$  переміщується в область частоти  $\omega_0$  і розщеплюється на два коливання, симетричні щодо частоти  $\omega_0$ , з частотами відповідно  $\omega_0 + \Omega$  верхня бічна частота, і  $\omega_0 - \Omega$  нижня бічна частота (рис. 86 для сигналу, наведеного на рис. 43 ).

Фізична ширина спектра модульованого сигналу в два рази більше ширини спектру сигналу модуляції.

Багатотональний модулюючий сигнал має довільний спектральний склад. На рис.87 наведено схематичний приклад амплітудних спектрів модулюючого і АМ-сигналів при багатотональній модуляції. Він також містить смуги верхніх і нижніх бічних частот відносно несучої частоти  $\omega_0$ , які є прямою і дзеркальною масштабними копіями модулюючого сигналу. Повна ширина спектра АМ-сигналу дорівнює подвоєній ширині спектра модулюючого сигналу.

**Амплітудно-маніпульовані сигнали.** В даний час інформація передається по каналах зв'язку в основному в цифровій формі.

Цифровий сигнал носить ступінчастий (стрибокподібний) характер. При модуляції його використовують в якості модулюючого сигналу. Відповідно, параметри несучого коливання, на які переноситься ступінчастий сигнал, також змінюються стрибкоподібно. Такий спосіб модуляції несучої називається маніпуляцією (keying), і може виконуватися з використанням усіх методів модулювання.

Амплітудно-маніпульовані сигнали (АМП) найпростішого типу являють собою послідовності радіоімпульсів, розділені паузами. Такі сигнали використовуються у системах передачі дискретних даних. Форма огинаючої радіоімпульсів в загальному випадку може бути довільною, паузи можуть відрізнятися за тривалістю від радіоімпульсів.

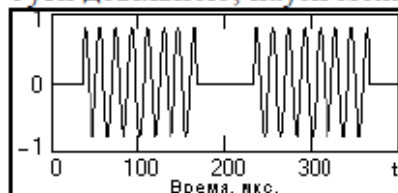


Рис. 88 АМП-сигнал

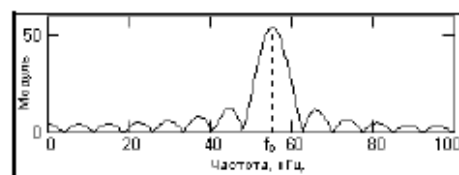


Рис. 89 Модуль спектра АМП-сигналу

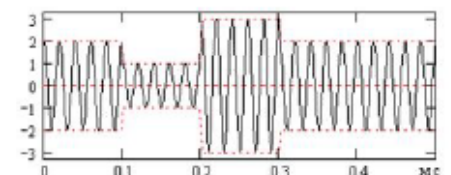


Рис. 90 АМП-сигнал

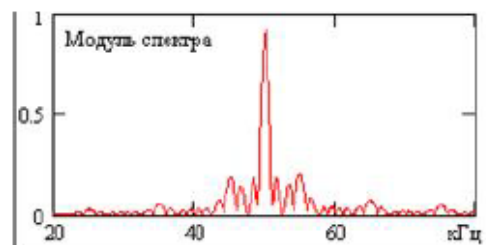


Рис. 91 Модуль спектра АМП-сигналу

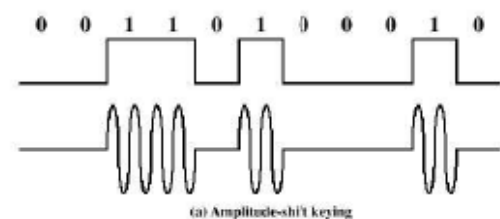


Рис. 92 Процес АМП

На рис. 88 наведено приклад амплітудно-маніпульованого сигналу. Модуль спектральної щільності сигналу наведено на рис. 89 Спектр прямокутного імпульсу досить слабо загасає і тягнеться необмежено далеко.

На рис. 90 наведено приклад форми класичного АМП сигналу при передачі декількох символів, кожному з яких відповідає індивідуальна амплітуда несучої частоти при постійній тривалості інтервалів послідовності. Модуль спектру сигналу наведено на рис. 91 і теж має досить велику ширину значної частини спектру навколо несучої частоти.

## 2. Кутова модуляція гармонічного сигналу

При кутовій модуляції (angle modulation) в несучому гармонічному коливанні  $u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  значення амплітуди коливань  $U_m$  залишається постійним, а інформація  $s(t)$  переноситься або на частоту  $\omega_0$ , або на фазовий кут  $\varphi_0$ . І в тому, і в іншому випадку поточне значення фазового кута гармонічного коливання  $u(t)$  визначає аргумент

$$\psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0,$$

який називають повною фазою коливання.

**Фазова модуляція (ФМ, phase modulation - PM).** При фазовій модуляції значення фазового кута постійної несучої частоти коливань  $\omega_0$  пропорційно амплітуді модулюючого сигналу  $s(t)$ . Відповідно, рівняння ФМ - сигналу визначається виразом:

$$u(t) = U_m \cos[\omega_0 t + \varphi_0 + \beta \cdot s(t)],$$

де  $\beta$  - коефіцієнт пропорційності, який називається **індексом фазової модуляції**.

Тобто при ФМ

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \beta \cdot s(t)$$

Приклад однотонального ФМ - сигналу наведено на рис. 93

При  $s(t) = 0$ , ФМ - сигнал є простим гармонічним коливанням і зображений на малюнку функцією  $u_0(t)$ .

Із збільшенням значень  $s(t)$  повна фаза коливань  $\psi(t) = \omega_0 t + \beta \cdot s(t)$  наростає в часі швидше і випереджає лінійне наростання  $\omega_0 t$ . Відповідно, при зменшенні значень  $s(t)$  швидкість росту повної фази в часі спадає. У моменти екстремальних значень  $s(t)$  абсолютне значення фазового зсуву  $\Delta\psi$  між ФМ - сигналом і значенням  $\omega_0 t$  немодульованого коливання також є максимальним і носить назву **девіації фази** (вгору  $\Delta\psi_{\text{в}} = \beta \cdot s_{\text{max}}(t)$ , або вниз  $\Delta\psi_{\text{н}} = \beta \cdot s_{\text{min}}(t)$  з урахуванням знака екстремальних значень модулюючого сигналу).

Для коливань з кутовою модуляцією застосовується також поняття **миттєвої частоти**  $\omega(t)$  (instantaneous frequency) - значення частоти коливання в конкретний момент часу.

**Частотна модуляція (ЧМ, frequency modulation - FM)** характеризується лінійною зв'язком модулюючого сигналу з миттєвою частотою коливань, при якій миттєва частота коливань утворюється складанням частоти високочастотного несучого коливання  $\omega_0$  зі значенням амплітуди модулюючого сигналу з певним коефіцієнтом пропорційності:

$$\omega(t) = \omega_0 + \beta \cdot s(t).$$

Відповідно, рівняння ЧМ-сигналу визначається виразом:

$$u(t) = U_m \cos[(\omega_0 + \beta \cdot s(t))t + \varphi_0],$$

Аналогічно ФМ, для характеристики глибини частотної модуляції використовуються поняття **девіації частоти** вгору  $\Delta\omega_{\text{в}} = \beta \cdot s_{\text{max}}(t)$ , і вниз  $\Delta\omega_{\text{н}} = \beta \cdot s_{\text{min}}(t)$ .

Частотна і фазова модуляція взаємопов'язані. Якщо змінюється початкова фаза коливання, змінюється і миттєва частота, і навпаки. З цієї причини їх і об'єднують під загальною назвою **кутової модуляції (КМ)**. За формою коливань з кутовою модуляцією неможливо визначити, до якого виду модуляції відноситься дане коливання, до ФМ або ЧМ, а при досить гладких функціях  $s(t)$  форми сигналів ФМ і ЧМ взагалі практично не відрізняються.

**Спектри сигналів з кутовою модуляцією**

Форма фізичних амплітудних спектрів однотонально частотно-модульованих сигналів щодо несучої частоти при різних індексах модуляції наведена на рис. 94

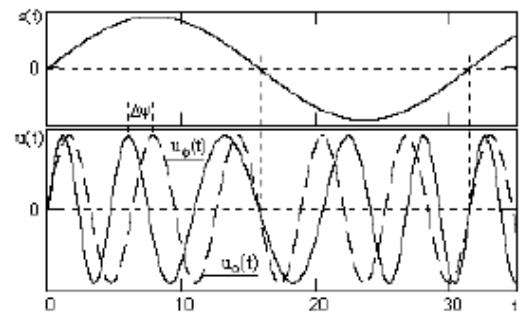


Рис. 93 Фазомодульований сигнал



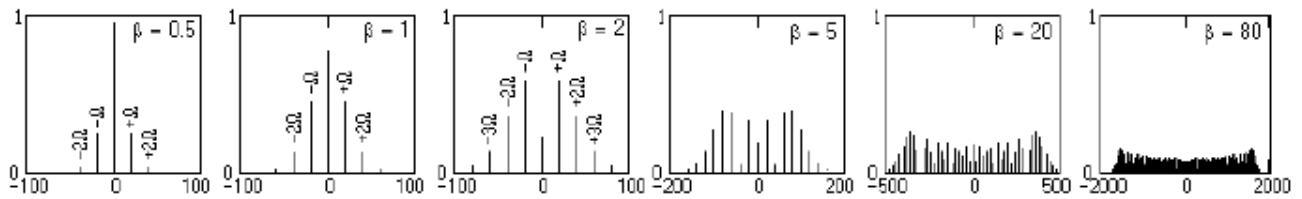


Рис. 94 Модулі спектрів ЧМ сигналу при різних індексах модуляції (несуча частота 2500 Гц, гармоніка модуляції 25 Гц, шкала частот у Гц відносно несучої)

Із зростанням індексу модуляції смуга частот, займана сигналом, розширюється.

Сигнали з багатотональною кутовою модуляцією відрізняються ще більшою складністю спектрального складу. У їхньому спектрі присутні не тільки бічні частоти з гармоніками частот модулюючого сигналу, але і бічні комбінаційні частоти типу  $\omega_c \pm \Omega_1 \pm \Omega_2 \pm \dots \pm \Omega_i$  з усіма можливими комбінаціями частот модулюючого сигналу  $\Omega_i$ . При безперервному спектрі модулюючого сигналу спектри ЧМ і ФМ сигналів також стають безперервними.

**Кутова маніпуляція.** Якщо в якості модулюючого сигналу використовується цифровий стрибкоподібний сигнал, то така модуляція перетворюється на маніпуляцію.

Основні види кутовий маніпуляції:

- фазова маніпуляція (phase shift keying - PSK) ;
- частотна маніпуляція (frequency shift keying - FSK) ;

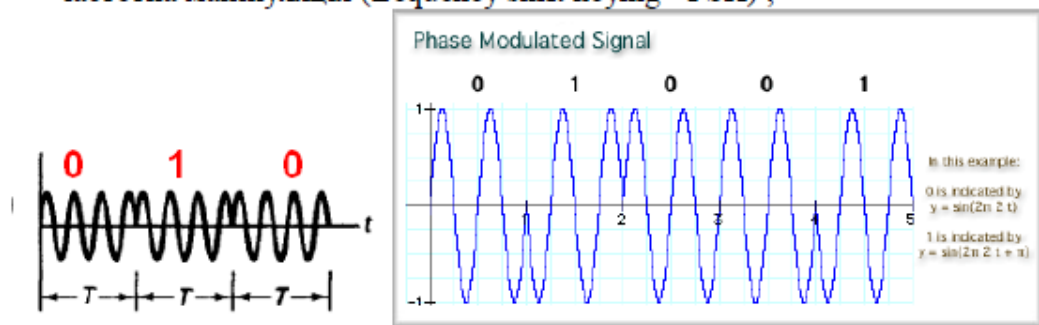


Рис.95 . Фазова маніпуляція

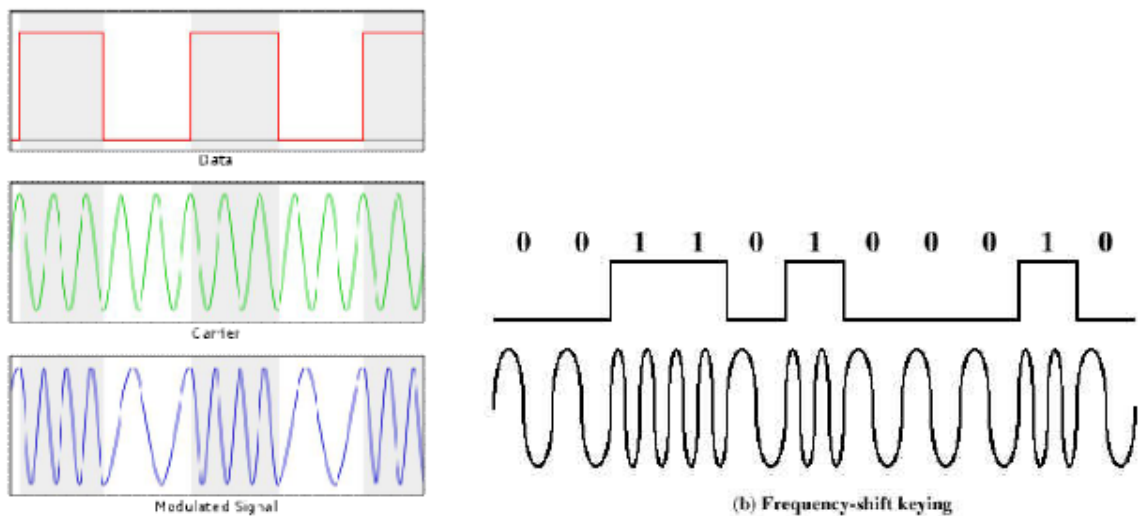


Рис. 96 . Частотна маніпуляція

У наведених прикладах, для PSK - змінній двійкового символу відповідає стрибок фази несучого коливання на 180 градусів, для FSK кожному можливому значенню переданого символу зіставляється індивідуальне значення частоти гармонійної несучої.

### Висновки

Щоб здійснити ефективну передачу сигналів в якому-небудь середовищі, необхідно здійснити модуляцію.

У широкому сенсі модуляція - це відображення або нанесення інформації на носій або переносник інформації.

У радіотехніці широкого поширення набули системи модуляції, які використовують в якості несучого просте гармонійне коливання  $u_{\text{нес}}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ , у якого є три постійних параметра  $U_m$ ,  $\omega_0$  і  $\varphi_0$ .

Змінюючи в часі той чи інший параметр, можна отримувати різні види модуляції.

### Контрольні питання

1. Амплітудна модуляція гармонічного сигналу.
2. Амплітудно-маніпульовані сигнали.
3. Кутова модуляція гармонічного сигналу.
4. Фазова модуляція.
5. Частотна модуляція.
6. Кутова маніпуляція.

## Питання для самоконтролю

1. Інформація
2. Повідомлення
3. Сигнал
4. Властивості інформації як об'єкту захисту.
5. Матеріальність носія.
6. Цінність інформації.
7. Інформація як товар.
8. Вплив часу на цінність інформації.
9. Синтаксична міра кількості інформації.
10. Семантична міра кількості інформації.
11. Види інформації, що підлягає захисту
12. Структура конфіденційної інформації.
13. Класифікація демаскуючих ознак.
14. Видові демаскуючі ознаки.
15. Класифікація та демаскуючі ознаки сигналів.
16. Класифікація та демаскуючі ознаки речовин.
17. Електричні та магнітні властивості речовин.
18. Пружні властивості речовин.
19. Джерела та носії інформації.
20. Запис та отримання інформації з носія.
21. Функціональні сигнали.
22. Сторонні випромінення.
23. Завади.
24. Спектральна структура прямокутного відео імпульсу та послідовності таких імпульсів.
25. Спектральна структура прямокутного радіо імпульсу та послідовності таких імпульсів.
26. Види загроз.
27. Види та підвиди технічної розвідки (оптичної, радіотехнічної)
28. Технології добування інформації.
29. Методи доступу до інформації. Дистанційне знімання інформації.
30. Методи доступу до інформації із зовні контрольованої зони.
31. Методи доступу до інформації без порушення державного кордону (супутникові канали, канали декаметрового, гектаметрового, кілометрового діапазонів).
32. Принципи одержання інформації про події та об'єкти за результатами спостереження середовища.
33. Основні поняття та визначення щодо полів. Класифікація полів; їх види.
34. Опис полів і величини, що їх характеризують.
35. Основні поняття та визначення щодо середовищ. Класифікація середовищ.

36. Властивості пружних середовищ.
37. Електромагнітні властивості середовищ.
38. Екранування електромагнітних полів.
39. Захист від витоку інформації по матеріально-речовинному каналу
40. Сторонні сили як джерела полів.
41. Рівняння і характеристики електромагнітних полів. Рівняння Максвела; їх суть.
42. Хвильові рівняння і методи їх розв'язання.
43. Вектор Умова – Пойнтінга.
44. Основні поняття та визначення щодо коливань; їх класифікація.
45. Вільні коливання; вимушені коливання.
46. Основні поняття та визначення щодо хвиль; їх класифікація.
47. Діапазони акустичних і електромагнітних хвиль.
48. Збудження і випромінювання хвиль.
49. Елементарний електричний вібратор.
50. Елементарний магнітний вібратор.
51. Елемент Гюйгенса.
52. Визначення і характеристики плоскої ЕМХ; уточнена класифікація середовищ на надвисоких частотах.
53. Коефіцієнти розповсюдження, згасання і фази.
54. Висновки з рішень рівнянь Максвела для плоскої однорідної ЕМХ.
55. Плоскі ЕМХ у ідеальному однорідному діелектрику.
56. Плоскі ЕМХ у реальному однорідному діелектрику.
57. Плоскі ЕМХ у реальних провідниках.
58. Плоскі ЕМХ у плазмі.
59. Поляризація плоских ЕМХ .
60. Плоскі ЕМХ у анізотропних середовищах; ефекти Фарадея та Коттон-Мутона.
61. Відбиття та заломлення плоских хвиль.
62. Принцип Гюйгенса-Френеля.
63. Зони Френеля; область суттєва для розповсюдження.
64. Дифракція хвиль на плоских екранах.
65. Дифракція Френеля; дифракція Фраунгофера.
66. Розповсюдження ЕМХ над нерівною поверхнею.
67. Вплив сферичності Землі; дальність прямої видимості.
68. Поле джерел, піднятих над землею; інтерференційний множник землі.
69. Рефракція і радіус кривизни променя.
70. Тропосферна рефракція; її види; дальність прямої видимості в умовах рефракції.
71. Іоносферна рефракція; критична частота вертикального та нахильного падіння.
72. Механізми розповсюдження радіохвиль у іоносфері.
73. Поглинання хвиль у тропосфері та у іоносфері.
74. Особливості розповсюдження радіохвиль різних діапазонів.

75. Розсіювання хвиль неоднорідностями; дальнє тропосферне розповсюдження.
76. Енергія сигналу, що приймається.
77. Основне рівняння радіозв'язку.
78. Математична модель сигналу.
79. Гармонійний сигнал.
80. Види сигналів.
81. Спектр періодичного сигналу.
82. Спектр неперіодичного сигналу.
83. Ширина спектра сигналу.
84. Поняття децибелів.
85. Амплітудна модуляція гармонічного сигналу.
86. Амплітудно-маніпульовані сигнали.
87. Кутова модуляція гармонічного сигналу.
88. Фазова модуляція. Частотна модуляція. Кутова маніпуляція.

### **Завдання до практичних занять**

1. Розрахувати групову швидкість ЕМХ у поліетилені та у міді; пояснити результати.
2. Розрахувати фазову швидкість ЕМХ у склі та у міді; пояснити результати.
3. Розрахувати групову швидкість ЕМХ у склі та у алюмінії; пояснити результати.
4. Розрахувати фазову швидкість ЕМХ у поліетилені та у міді; пояснити результати.
5. Розрахувати фазову швидкість ЕМХ у воді та у міді; пояснити результати.
6. Визначити глибину проникнення радіохвиль довжиною 1, 2, 5, 10, 30, 50см, 1, 2, 6, 10, 100, 500, 1000м у воду солону, дерево, парафін, мідь, залізо і порівняти результати.
7. У скільки разів відрізняється довжина хвилі низьких та ультрависоких частот?
8. У скільки разів відрізняється довжина хвилі дуже низьких та ультрависоких частот?
9. У скільки разів відрізняється довжина хвилі низьких та надвисоких частот?
10. У скільки разів відрізняється довжина хвилі середніх та ультрависоких частот?
11. Розрахувати можливу відстань зв'язку між стільниковою станцією, антена якої знаходиться на висоті 16 метрів, та мобільним абонентом.
12. Розрахувати можливу відстань зв'язку між стільниковою станцією, антена якої знаходиться на висоті 25 метрів, та мобільним абонентом.

13. Розрахувати можливу відстань зв'язку між стільниковою станцією, антена якої знаходиться на висоті 49 метрів, та мобільним абонентом.
14. Розрахувати можливу відстань зв'язку між стільниковою станцією, антена якої знаходиться на висоті 36 метрів, та мобільним абонентом.
15. На якій відстані може бути прийнятий сигнал радіостанції метрового діапазону, яка розміщена на літаку, що летить на висоті 10км?
16. Визначити необхідну висоту антени для забезпечення зв'язку з об'єктом, який знаходиться на відстані 5 (6; 7; 8; 9; 10; 12; 14; 15; 16; 18; 20;) км. і на висоті 1 (2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12) метрів.
17. Визначити площу покриття, яку має телевізійний канал УТ1 при умові, що передавальна антена встановлена на верхівці київської телевізійної вежі.
18. Визначити площу покриття, яку має радіомовний канал FM-100, при умові, що передавальна антена встановлена на верхівці щекавицької радіовежі.
19. На якій відстані від київського телецентру користувачі можуть приймати передачі першого каналу?
20. Розрахувати площу покриття станції стільникового зв'язку, антена якої знаходиться на висоті 20 метрів.
21. На якій відстані від спостерігача, що стоїть на березі моря, знаходиться горизонт.
22. Визначити, як зміниться потенційна відстань зв'язку, якщо висоту антени, необхідну для забезпечення зв'язку з об'єктом, який знаходиться на відстані 12,5 км. і на висоті 1 метр, зменшити на 0,5 метра.
23. Визначити необхідну висоту щогл для розміщення антен радіорелейних станцій, що утворюють канал зв'язку довжиною 160 км; кількість проміжних станцій -3.
24. На якій відстані у степовій місцевості спостерігач може побачити світло ліхтаря, який знаходиться на висоті 5м.
25. Визначити необхідну висоту розміщення антен станцій стільникового зв'язку, розташованих вздовж паралельних доріг, відстань між якими становить 33км, для забезпечення покриття смуги між дорогами.

### Завдання на самостійну роботу

Виконувати за варіантами відповідно до номеру у списку групи.

Відповідь на перше питання обрати із представленого переліку і вписати її. Відповіді на решту питань формулювати стисло і по суті.

Матеріали розв'язання задач обов'язково повинні містити необхідні розрахункові формули з поясненням суті величин, які в них входять, та пояснення отриманих чисельних результатів. Необхідно звернути увагу на розмірність величин.

Наявність матеріалів виконаного завдання є умовою допуску до екзамену.

#### Варіант 1

1	Що таке інформація?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. відомості, що повідомляються в газетах, журналах, радіо та телепередачах</li> <li>2. сукупність відомостей про яку-небудь подію чи об'єкт, що представляють інтерес для суб'єкту предметної діяльності і розглядаються з позиції передачі цих відомостей в просторі та (або) у часі;</li> <li>3. всі відомості, які може отримувати людина по різним каналам;</li> <li>4. відомості про яку-небудь подію чи об'єкт, що представляють інтерес для суб'єкту предметної діяльності;</li> <li>5. те, що міститься у повідомленні.</li> </ol>
---	---------------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки людини як джерела інф.

3. Класифікація полів; їх види.

4. У скільки разів відрізняється довжина хвилі низьких та ультрависоких частот?

5. Розрахувати потенційно можливу відстань зв'язку між стільниковою станцією, антена якої знаходиться на висоті 16 метрів, та мобільним абонентом.

6. Визначити мах. радіус  $1^i$  та  $2^i$  зони Френеля при  $f = 300$  кГц і відстані між абонентами  $r = 200$  км.

7. Цінність інформації.

8. Визначити глибину проникнення у мідь ЕМХ довжиною  $\lambda = 1,5$  м. Для яких діапазонів ЕМХ такий шар може бути екраном?

#### Варіант 2

1	Повідомлення	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. інформація, що виражена в визначеній формі і призначена для передачі</li> <li>2. закінчений фрагмент тексту про яку-небудь подію</li> <li>3. звуковий чи електричний сигнал, який переданий абоненту;</li> <li>4. те, що переносить сигнал;</li> <li>5. відомості про якусь подію.</li> </ol>
---	--------------	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки ПЕОМ як джерела інф.

3. ЕМП і величини, що його характеризують.

4. Як звуться хвилі діапазону частот 300...3000 МГц? Довести розрахунком.

5. Визначити необхідну висоту антени для забезпечення зв'язку з об'єктом, який знаходиться на відстані 12 км. і на висоті 2 метрів.

6. Відстань між джерелом і приймачем  $r = 2$  км. Як відрізняються радіуси  $1^i$  зони Френеля на відстані  $\rho_0 = 200$  м від джерела при робочій частоті  $f = 500$  кГц та  $f = 1$  МГц.
7. Інформація як товар.
8. Визначити фазову швидкість у золоті при  $f = 2$  ГГц.

### Варіант 3

1	Сигнал	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. функція часу в вигляді електричних коливань</li> <li>2. фізичний процес, що однозначно відображає повідомлення</li> <li>3. фізичний процес, що передається від одного абонента до іншого;</li> <li>4. електричні коливання</li> <li>5. фізичний процес, що є носієм повідомлення</li> </ol>
---	--------	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу на відеочастоті.
3. Що таке Скін-ефект. Як визначити глибину проникнення ЕМХ у середовище із втратами?
4. У скільки разів відрізняється довжина хвилі дуже низьких та ультрависоких частот? Довести розрахунком.
5. На якій відстані від київського телецентру користувачі можуть приймати передачі першого каналу? (Вважати, що антена цього каналу розташована на верхівці вежі).
6. Як зміниться максимальний радіус  $1^i$  зони Френеля при зміні відстані між пунктами випромінювання і прийому з  $r = 30$  км до  $r = 40$  км. Робоча частота  $f = 300$  МГц.
7. Вплив часу на цінність інформації.
8. Визначити значення діаграми спрямованості ЕЕВ у площині Е при  $\Theta = 30, 45$  та  $180$  градусів.

### Варіант 4

1	Плоска хвиля?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. хвиля, що розповсюджується в одній площині;</li> <li>2. хвиля з лінійною поляризацією;</li> <li>3. хвиля, у якої фронт є площина;</li> <li>4. хвиля, що розглядається у Декартовій системі координат;</li> <li>5. хвиля, у якої вектори Е і Н лежать у одній площині;</li> <li>6. хвиля, у якої вектори Е і Н лежать у площині, перпендикулярній напрямку розповсюдження.</li> </ol>
---	---------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу на радіочастоті
3. Пружні властивості середовищ.
4. Як зветься хвилі діапазону частот  $300 \dots 3000$  кГц; довести розрахунками.
5. Визначити необхідну висоту антени для забезпечення радіозв'язку з об'єктом, який знаходиться на відстані  $10$  км. і на висоті  $1$  метр.
6. Відстань між пунктами випромінювання і прийому  $r = 5$  км. Робоча частота  $f = 300$  МГц. Як при цьому відрізняються радіуси  $1^i$  зони Френеля на відстанях  $\rho_0 = 1$  км та  $\rho_0 = 3$  км від передавача.
7. Синтаксична міра кількості інформації.
8. Чи буде прозорою іоносфера для частот  $f = 10$  МГц та  $f = 7$  МГц при концентрації електронів у максимумі шару  $F_2 N_e = 10^{12}$  е/м<sup>3</sup>?



## Варіант 5

1.	Що таке фронт хвилі?	1. лінія розміщення однакових значень напруженості поля; 2. площина розміщення у просторі однакових значень напруженості поля; 3. напрям, у якому розповсюджується хвиля; 4. геометричне місце точок у просторі, де хвиля має однакові значення фази; 5. поверхня розміщення у просторі однакових значень фази поля.
----	----------------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки звукового сигналу.
3. Способи та результат розв'язання рівнянь Максвелла.
4. У скільки разів відрізняється довжина хвилі низьких та надвисоких частот?
5. Розрахувати площу покриття станції стільникового зв'язку, антена якої знаходиться на висоті 20 метрів.
6. Як відрізняються радіуси 1<sup>ї</sup> зони Френеля при робочій частоті  $f = 20\text{ГГц}$  та  $f = 1\text{ГГц}$  на відстані  $r_0 = 400\text{ м}$  від джерела. Відстань між джерелом і приймачем  $r = 1\text{ км}$ .
7. Семантична міра кількості інформації.
8. Визначити ширину ДС на рівні  $0,5P$  антенної решітки із 15 елементів з кроком  $d = \lambda/2$  на частоті  $300\text{МГц}$  при рівномірному амплітудному розподілі струму. Як і на скільки зміниться ширина ДС на частоті  $360\text{МГц}$ . Пояснити результат.

## Варіант 6

1.	Про що свідчить рівність фазової швидкості у середовищі $300000\text{км/с}$ ?	1. Середовище із втратами. 2. Середовище без втрат. 3. Середовище ідеальний діелектрик. 4. Середовище ідеальний провідник. 5. Середовище напівпровідник. 6. Середовище реальний діелектрик. 7. Середовище реальний провідник.
----	---	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу ІЧ діапазону.
3. Особливості ближньої зони ЕЕВ.
4. Як зветься хвилі діапазону частот  $3...30\text{ ГГц}$ ? Довести розрахунком.
5. На якій відстані від спостерігача, що стоїть на березі моря біля води, знаходиться горизонт.
6. Визначити мах. діаметр 1<sup>ї</sup> та 3<sup>ї</sup> зони Френеля при  $f = 1\text{ГГц}$  і відстані між абонентами  $r = 2\text{ км}$ .
7. Види інформації, що підлягає захисту
8. Розрахувати довжину хвилі у провіднику (золото) при  $f = 900\text{МГц}$ .

## Варіант 7

1.	Повідомлення	1. закінчений фрагмент тексту про яку-небудь подію 2. те, що переносить сигнал; 3. інформація, що виражена в визначеній формі і призначена для передачі 4. звуковий чи електричний сигнал, який переданий абоненту 5. звуковий чи електричний сигнал, який прийнятий отримувачем інформації.
----	--------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу оптичного діапазону.
3. Характеристика спрямованості та діаграма спрямованості.
4. У скільки разів відрізняється довжина хвилі середніх та ультрависоких частот?
5. Визначити, як зміниться потенційна відстань радіозв'язку, якщо висоту антени, необхідну для забезпечення зв'язку з об'єктом, який знаходиться на відстані 12,4 км. і на висоті 1 метр, зменшити на 1 метр.
6. Як зміниться максимальний радіус  $2^i$  зони Френеля при зміні відстані між пунктами випромінювання і прийому з  $r = 100$  км до  $r = 50$  км. Робоча частота  $f = 30$  МГц.
7. Класифікація демаскуючих ознак
8. Визначити доплеровський зсув частоти при зближенні об'єктів, які здійснюють радіозв'язок. Швидкість першого 60 км/год; другого 100 км/год;  $f = 400$  МГц.

### Варіант 8

1.	Сигнал	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. те, що створює джерело;</li> <li>2. результат перетворення повідомлення неелектричної природи в електричний сигнал ;</li> <li>3. електричні коливання.</li> <li>4. функція часу в вигляді електричних коливань</li> <li>5. фізичний процес, що однозначно відображає повідомлення</li> <li>6. фізичний процес, що передається від одного абонента до іншого</li> <li>7. фізичний процес, що є носієм повідомлення</li> </ol>
----	--------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки будівлі, де працює структура, яка здійснює обробку інформації.
3. Рівняння Максвелла та їх суть.
4. Як довжина хвилі пов'язана з частотою?
5. Визначити необхідну висоту щогла для розміщення антен радіорелейних станцій, що утворюють канал зв'язку довжиною 160 км; кількість проміжних станцій -3.
6. Відстань між пунктами випромінювання і прийому  $r = 1000$  м. Робоча частота  $f = 1$  ГГц. Як при цьому відрізняються радіуси  $1^i$  зони Френеля на відстанях  $\rho_0 = 500$  м та  $\rho_0 = 400$  м від передавача.
7. Класифікація та демаскуючі ознаки речовин.
8. Визначити глибину проникнення хвилі у залізо при  $\lambda = 20$  м. Для яких діапазонів ЕМХ такий шар може бути екраном?

### Варіант 9

1.	Що таке фронт хвилі	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. місце, де хвиля утворюється;</li> <li>2. повний опис хвилі;</li> <li>3. геометричне місце точок у просторі, де хвиля має однакову фазу;</li> <li>4. поверхня, де хвиля існує;</li> <li>5. поверхня, якої хвиля досягла певний момент часу;</li> <li>6. площина, у якій лежать вектори <math>E</math> і <math>H</math>;</li> <li>7. сукупність точок у просторі, де поле має однакову напруженість.</li> </ol>
----	---------------------	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки ПЕОМ як системи обробки інф.
3. Особливості дальньої зони ЕЕВ.
4. За допомогою розрахунків визначити, як зветься хвилі діапазону частот 30...300 кГц

5. На якій відстані у степовій місцевості спостерігач може побачити світло ліхтаря, який знаходиться на висоті 5м.
6. Відстань між джерелом і приймачем  $r = 30$ км. Як відрізняються радіуси 1<sup>ї</sup> зони Френеля на відстані  $\rho_0 = 10$ км від джерела. при робочій частоті  $f = 300$ МГц, та  $f = 100$ МГц.
7. Видові демаскуючі ознаки.
8. Порівняти ширину ДС на рівні 0,5Р дзеркальної антени діаметром 5м при рівномірному та косинусному амплітудних розподілах струму; робоча частота 1000 МГц.

### Варіант 10

1.	Що таке інформація?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. відомості, що представляють інтерес;</li> <li>2. відомості, що повідомляються у засобах масової інформації;</li> <li>3. відомості про яку-небудь подію чи об'єкт, що представляють інтерес для суб'єкту предметної діяльності;</li> <li>4. сукупність відомостей про яку-небудь подію чи об'єкт, яка представляє інтерес для суб'єкта предметної діяльності і що розглядається з позиції передачі цих відомостей в просторі і в часі.</li> <li>5. всі відомості, які може отримувати людина по різним каналам;</li> <li>6. те, що міститься у повідомленні.</li> </ol>
----	---------------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки АТС
3. Фазова швидкість у середовищі із втратами.
4. У скільки разів відрізняються частоти кілометрових та дециметрових хвиль?
5. Радіостанція метрового діапазону забезпечує можливість приймати її передачі на площі 5000км<sup>2</sup>. Визначити висоту щогли, на якій знаходиться її антена.
6. Відстань між пунктами випромінювання і прийому  $r = 20$  км. Робоча частота  $f = 3$ МГц. Як при цьому відрізняються радіуси 3<sup>ї</sup> зони Френеля на відстанях  $\rho_0 = 10$  км та  $\rho_0 = 8$  км від передавача.
7. Класифікація та демаскуючі ознаки сигналів.
8. Визначити глибину проникнення хвилі у латунь;  $\lambda = 1$ м. Для яких діапазонів ЕМХ такий шар не може бути екраном?

### Варіант 11

1.	Які величини необхідно знати для опису джерела випромінювання?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. заряди;</li> <li>2. струми;</li> <li>3. щільність струму;</li> <li>4. щільність заряду;</li> <li>5. умовні ймовірності появи на виході джерела певного символу в деякий момент.</li> </ol>
----	--	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки засобу перехоплення звукової інформації.
3. Коефіцієнт фази.
4. У скільки разів відрізняються довжини хвиль ультрависоких та низьких частот?
5. Визначити необхідну висоту розміщення антен станцій стільникового зв'язку, розташованих вздовж паралельних доріг, відстань між якими становить 33км, для забезпечення покриття смуги між дорогами.
6. Визначити внутрішній та зовнішній радіуси другої зони Френеля при роботі радіозасобу на частоті 10 МГц при  $r=200$ км;  $r_0=150$ км.

7. Джерела та носії інформації.  
8. Визначити фазову швидкість у сріблі;  $\lambda = 2\text{м}$ .

### Варіант 12

1.	Про що свідчить фазова швидкість у середовищі менша за $300000000\text{м/с}$ ?	1.	Середовище із втратами.
		2.	Середовище без втрат.
		3.	Середовище ідеальний діелектрик.
		4.	Середовище ідеальний провідник.
		5.	Середовище реальний провідник.
		6.	Середовище напівпровідник.

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки друкованого документу  
3. Уточнена класифікація середовищ із втратами щодо монохроматичного поля.  
4. У скільки разів відрізняються довжини хвиль низьких та гіпервисоких частот?  
5. На якій відстані може бути прийнятий сигнал радіостанції метрового діапазону, яка розміщена на літаку, що летить на висоті  $10\text{км}$ ?  
6. Як зміниться максимальний радіус  $1^{\text{i}}$  зони Френеля при зміні відстані між пунктами випромінення і прийому з  $r = 16\text{км}$  до  $r = 10\text{км}$  Робоча частота  $f = 1\text{ГГц}$ .  
7. Функціональні сигнали.  
8. Визначити необхідні діаметри дзеркальної антени для формування діаграми спрямованості шириною  $5\text{град}$  на частоті  $6\text{ГГц}$  та на частоті  $10\text{ГГц}$ .

### Варіант 13

1.	Про що свідчить нерівність $\text{tg}\Delta \ll 1$ ?	1.	Середовище із втратами.
		2.	Середовище без втрат.
		3.	Середовище ідеальний діелектрик.
		4.	Середовище ідеальний провідник.
		5.	Середовище реальний провідник.
		6.	Середовище напівпровідник.
		7.	Середовище реальний діелектрик.

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки засобу перехоплення інформації у оптичному діапазоні.  
3. Коефіцієнт згасання.  
4. Які граничні значення мають і як зветься частоти, довжина хвиль яких лежить у межах  $10\text{см} \dots 100\text{см}$ ? Довести розрахунками.  
5. На якій висоті треба розташувати передавальну антену радіоцентру, щоб забезпечити площу покриття  $1250\text{км}^2$ ?  
6. Визначити внутрішній та зовнішній радіуси другої зони Френеля при роботі радіозасобу на частоті  $100\text{кГц}$  при  $r=600\text{км}$ ;  $r_0=150\text{км}$ .  
7. Сторонні випромінення.  
8. Визначити доплеровський зсув частоти при зближенні об'єктів, які здійснюють радіозв'язок. Швидкість першого  $80\text{км/год}$ ; другого  $100\text{км/год}$ ;  $f=400\text{МГц}$ .

## Варіант 14

1.	Про що свідчить $\lambda_c < \lambda_0$ ?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Середовище із втратами.</li> <li>2. Середовище без втрат.</li> <li>3. Середовище ідеальний діелектрик.</li> <li>4. Середовище ідеальний провідник.</li> <li>5. Середовище реальний провідник.</li> <li>6. Середовище напівпровідник.</li> </ol>
----	---	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки станції стільникового зв'язку.
3. Принцип Гюйгенса-Френеля.
4. Як і чому звуться хвилі; визначити граничні значення довжин хвиль діапазону частот 30...300ГГц.
5. Визначити, як зміниться потенційна відстань зв'язку, якщо висоту антени, необхідну для забезпечення зв'язку з об'єктом, який знаходиться на відстані 16,5 км. і на висоті 1 метр, зменшити на 1 метр.
6. Відстань між пунктами випромінювання і прийому  $r = 100$ км. Робоча частота  $f = 20$ МГц. Як при цьому відрізняються радіуси 1<sup>ї</sup> зони Френеля на відстанях  $\rho_0 = 50$ км та  $\rho_0 = 20$ км від передавача .
7. Завади; класифікація та параметри.
8. Визначити глибину проникнення у срібло ЕМХ довжиною  $\lambda = 10$ см. Для яких діапазонів ЕМХ такий шар може бути екраном?

## Варіант 15

1	Повідомлення	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. інформація, що виражена в визначеній формі і призначена для передачі</li> <li>2. звуковий чи електричний сигнал, який переданий абоненту;</li> <li>3. те, що переносить сигнал.</li> <li>4. закінчений фрагмент тексту про яку-небудь подію</li> <li>5. дані, що містять інформацію.</li> </ol>
---	--------------	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки ПЕОМ як джерела інф.
3. Що таке фазова швидкість?
4. У скільки разів відрізняється довжина хвилі низьких та високих частот?
5. Розрахувати потенційно можливу відстань зв'язку між стільниковою станцією, антена якої знаходиться на висоті 12 метрів, та абонентом.
6. Визначити мах. радіуси 1<sup>ї</sup> зони Френеля при  $f = 2400$  МГц і відстані між абонентами  $r = 150$ м та  $r = 50$ м.
7. Види загроз інформації.
8. Порівняти ширину ДС на рівні 0,5Р дзеркальної антени з круглою апертурою діаметром 1м при рівномірному та косинусному амплітудних розподілах струму; робоча частота 3 ГГц.

## Варіант 16

1.	Що таке інформація?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. відомості, що повідомляються в газетах, журналах, радіо та телепередачах</li> <li>2. сукупність відомостей про яку-небудь подію чи об'єкт, що представляють інтерес для суб'єкту предметної діяльності і розглядаються з позиції передачі цих відомостей в просторі та (або) у часі;</li> <li>3. всі відомості, які може отримувати людина по різних каналам;</li> <li>4. відомості про яку-небудь подію чи об'єкт, що представляють інтерес для суб'єкту предметної діяльності;</li> <li>5. те, що міститься у повідомленні.</li> </ol>
----	---------------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки електронного носія інформації.
3. Акустичне поле і величини, що його характеризують.
4. Як звуться хвилі діапазону частот 30...300 кГц? Довести розрахунком.
5. Визначити необхідну висоту антени для забезпечення зв'язку з об'єктом, який знаходиться на відстані 30 км. і на висоті 5 метрів.
6. Як відрізняються радіуси 1<sup>ї</sup> зони Френеля на відстані  $\rho_0 = 200$  м від джерела. Відстань між джерелом і приймачем  $r = 1$  км при робочій частоті  $f = 500$  МГц та  $f = 1$  ГГц.
7. Види та підвиди технічної розвідки (оптичної, радіотехнічної)
8. Чи буде прозорою іоносфера для радіохвиль довжиною 30 м та 10 м при їх вертикальному випромінюванні з поверхні землі та концентрації електронів у максимумі шару  $F_2 N_e = 10^{12}$  е/м<sup>3</sup>?

## Варіант 17

1	Сигнал	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. функція часу в вигляді електричних коливань</li> <li>2. фізичний процес, що однозначно відображає повідомлення</li> <li>3. фізичний процес, що передається від одного абонента до іншого;</li> <li>4. електричні коливання</li> <li>5. фізичний процес, що є носієм повідомлення</li> </ol>
---	--------	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу на відеочастоті.
3. Класифікація коливань; їх види.
4. У скільки разів відрізняється довжина хвилі дуже високих та надвисоких частот? Довести розрахунком.
5. На якій відстані від київського телецентру користувач, приймальна антена якого розміщена на висоті 5 м, може приймати передачі першого каналу УТ? (Вважати, що антена цього каналу розташована на верхівці вежі).
6. Як зміниться максимальний радіус 1<sup>ї</sup> зони Френеля при зміні відстані між пунктами випромінювання і прийому з  $r = 40$  км до  $r = 100$  км. Робоча частота  $f = 150$  МГц.
7. Технології добування інформації.
8. Визначити фазову швидкість у алюмінії;  $\lambda = 1$  м.

## Варіант 18

1.	Плоска хвиля?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. хвиля, що розповсюджується в одній площині;</li> <li>2. хвиля з лінійною поляризацією;</li> <li>3. хвиля, у якої вектори <math>E</math> і <math>H</math> лежать у одній площині;</li> <li>4. хвиля, у якої фронт є площина;</li> <li>5. хвиля, що розглядається у Декартовій системі координат;</li> <li>6. хвиля, у якої вектори <math>E</math> і <math>H</math> лежать у площині, перпендикулярній напрямку розповсюдження.</li> </ol>
----	---------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки телевізійного сигналу.
3. Пружні властивості середовищ.
4. Як звуться хвилі діапазону частот 30...300 ГГц; довести розрахунками.
5. Визначити необхідну висоту антени для забезпечення зв'язку з об'єктом, який знаходиться на відстані 200 км. і на висоті 5 метрів.
6. Відстань між пунктами випромінювання і прийому  $r = 5$  км. Робоча частота  $f = 3000$  МГц. Як при цьому відрізняються радіуси 1<sup>ї</sup> зони Френеля на відстанях  $r_0 = 2$  км та  $r_0 = 3$  км від приймача.
7. Методи доступу до інформації. Дистанційне знімання інформації
8. Визначити глибину проникнення у золото ЕМХ довжиною  $\lambda = 15$  см. Для яких діапазонів ЕМХ такий шар може бути екраном?

## Варіант 19

1.	Що таке фронт хвилі?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. геометричне місце точок у просторі, де хвиля має однакові значення фази;</li> <li>2. лінія розміщення однакових значень напруженості поля;</li> <li>3. площина розміщення у просторі однакових значень напруженості поля;</li> <li>4. напрям, у якому розповсюджується хвиля;</li> <li>5. поверхня розміщення у просторі однакових значень фази поля.</li> </ol>
----	----------------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки телеграфного сигналу.
3. Способи та результат розв'язання рівнянь Максвелла.
- 4 У скільки разів відрізняється довжина хвилі наднизьких та гіпервисоких частот?
5. Розрахувати площу покриття станції стільникового зв'язку, антена якої знаходиться на висоті 10 метрів.
6. Як відрізняються радіуси 2<sup>ї</sup> зони Френеля при робочій частоті  $f = 12$  ГГц та  $f = 3$  ГГц на відстані  $r_0 = 1000$  м від джерела. Відстань між джерелом і приймачем  $r = 4$  км.
7. Методи доступу до інформації із зовні контрольованої зони.
8. Визначити значення діаграми спрямованості ЕМВ у площині  $H$  при  $\Theta = 30, 45$  та  $180$  градусів.

### Варіант 20

1.	Про що свідчить рівність фазової швидкості у середовищі 300000км/с?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Середовище із втратами.</li> <li>2. Середовище без втрат.</li> <li>3. Середовище ідеальний провідник.</li> <li>4. Середовище напівпровідник.</li> <li>5. Середовище реальний діелектрик.</li> <li>6. Середовище реальний провідник.</li> <li>7. Середовище ідеальний діелектрик.</li> </ol>
----	---	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки сигналу ІЧ діапазону.
3. Особливості ближньої зони ЕЕВ.
4. Як звуться хвилі діапазону частот 3...30 МГц? Довести розрахунком.
5. На якій відстані від маяка, що стоїть на березі моря біля води і має висоту 20м, знаходиться горизонт.
6. Визначити мах. діаметр  $1^i$  та  $2^i$  зони Френеля при  $f = 3\text{ГГц}$  і відстані між абонентами  $r = 4\text{ км}$ .
7. Методи доступу до інформації без порушення державного кордону (супутникові канали).
8. Визначити доплеровський зсув частоти при віддаленні об'єктів, які здійснюють радіозв'язок. Швидкість першого 100км/год; другого 90км/год;  $f = 1000\text{МГц}$ .

### Варіант 21

1.	Повідомлення	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. закінчений фрагмент тексту про яку-небудь подію</li> <li>2. те, що переносить сигнал;</li> <li>3. інформація, що виражена в визначеній формі і призначена для передачі</li> <li>4. звуковий чи електричний сигнал, який переданий абоненту</li> <li>5. звуковий чи електричний сигнал, який прийнятий отримувачем інформації.</li> </ol>
----	--------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки телефонного сигналу.
3. Характеристика спрямованості та діаграма спрямованості ЕЕВ.
4. У скільки разів відрізняється довжина хвилі низьких та ультрависоких частот?
5. Визначити, як зміниться потенційна відстань радіозв'язку, якщо висоту антени, необхідну для забезпечення зв'язку з об'єктом, який знаходиться на відстані .25 км. і на висоті 1 метр, збільшити на 2 метри.
6. Як зміниться максимальний радіус  $1^i$ , зони Френеля при зміні відстані між пунктами випромінення і прийому з  $r = 800\text{км}$  до  $r = \dots 500.\text{км}$  Робоча частота  $f = 100\text{МГц}$ .
7. Методи доступу до інформації без порушення державного кордону (канали декаметрового діапазону)
8. Визначити глибину проникнення у алюміній ЕМХ довжиною  $\lambda = 30\text{см}$ . Для яких діапазонів ЕМХ такий шар може бути екраном?



## Варіант 22

1.	Що таке фронт хвилі	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. місце, де хвиля утворюється;</li> <li>2. повний опис хвилі;</li> <li>3. геометричне місце точок у просторі, де хвиля має однакову фазу;</li> <li>4. поверхня, де хвиля існує;</li> <li>5. поверхня, якої хвиля досягла певний момент часу;</li> <li>6. площина, у якій лежать вектори <math>E</math> і <math>H</math>;</li> <li>7. сукупність точок у просторі, де поле має однакову напруженість.</li> </ol>
----	---------------------	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки будівлі, де працює структура, яка здійснює зберігання інформації.

3. Рівняння Максвелла та їх суть.

4. Як частота пов'язана з довжиною хвилі?

5. Визначити необхідну висоту щогл для розміщення антен радіорелейних станцій, що утворюють канал зв'язку довжиною 200 км; кількість проміжних станцій -4.

6. Відстань між пунктами випромінювання і прийому  $r = 500$  м. Робоча частота  $f = 2$  ГГц. Як при цьому відрізняються радіуси  $2^i$  зони Френеля на відстанях  $\rho_0 = 200$  м та  $\rho_0 = 400$  м від передавача.

7. Методи доступу до інформації без порушення державного кордону (канали гектаметрового діапазону).

8. Визначити ширину ДС на рівні  $0,5P$  антенної решітки із 12 елементів з кроком  $d = \lambda/2$  на частоті 900 МГц при рівномірному амплітудному косинусному розподілі струмів. Пояснити результат.

## Варіант 23

1.	Сигнал	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. те, що створює джерело;</li> <li>2. результат перетворення повідомлення неелектричної природи в електричний сигнал;</li> <li>3. електричні коливання.</li> <li>4. функція часу в вигляді електричних коливань</li> <li>5. фізичний процес, що однозначно відображає повідомлення</li> <li>6. фізичний процес, що передається від одного абонента до іншого</li> <li>7. фізичний процес, що є носієм повідомлення</li> </ol>
----	--------	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки ПЕОМ яка виконує функції сервера.

3. Особливості дальньої зони диполя Герца.

4. За допомогою розрахунків визначити, як зветься хвилі діапазону частот 30...300 МГц

5. На якій відстані у степовій місцевості спостерігач може побачити верхівку дерева, яке має висоту 16м.

6. Як відрізняються радіуси  $2^i$  зони Френеля на відстані  $\rho_0 = 20$  км від джерела. Відстань між джерелом і приймачем  $r = 30$  км при робочій частоті  $f = 100$  МГц, та  $f = 1000$  МГц.

7. Опис полів і величини, що їх характеризують.

8. Порівняти ширину ДС на рівні  $0,5P$  у вертикальній та горизонтальній площинах дзеркальної антени з еліптичною апертурою горизонтальний розмір якої становить 1м, а вертикальний 0,6м при рівномірному амплітудному розподілі струму; робоча частота 1 ГГц.

## Варіант 24

1.	Що таке інформація?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. відомості, що представляють інтерес;</li> <li>2. відомості, що повідомляються у засобах масової інформації;</li> <li>3. відомості про яку-небудь подію чи об'єкт, що представляють інтерес для суб'єкту предметної діяльності;</li> <li>4. сукупність відомостей про яку-небудь подію чи об'єкт, яка представляє інтерес для суб'єкта предметної діяльності і що розглядається з позиції передачі цих відомостей в просторі і в часі.</li> <li>5. всі відомості, які може отримувати людина по різним каналам;</li> <li>6. те, що міститься у повідомленні.</li> </ol>
----	---------------------	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки архіву.

3. Фазова швидкість у середовищі без втрат.

4. У скільки разів відрізняються частоти метрових та міліметрових хвиль?

5. Радіостанція метрового діапазону повинна забезпечити можливість приймати її передачі на площі  $21000\text{км}^2$ . Визначити висоту шогли, на якій знаходиться її антена.

6. Відстань між пунктами випромінювання і прийому  $r = 100$  км. Робоча частота  $f = 10\text{МГц}$ . Як при цьому відрізняються радіуси  $2^i$  зони Френеля на відстанях  $\rho_0 = 30$  км та  $\rho_0 = 40$  км від передавача.

7. Діапазони акустичних хвиль.

8. Чи може бути екраном шар міді товщиною  $0,1\text{мм}$  для ЕМХ довжиною  $1\text{дм}$ ?

## Варіант 25

1.	Які величини необхідно знати для опису джерела випромінювання?	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. заряди;</li> <li>2. струми;</li> <li>3. щільність струму;</li> <li>4. щільність заряду;</li> <li>5. умовні ймовірності появи на виході джерела певного символу в деякий момент.</li> </ol>
----	--	--

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки телевізійного центру.

3. Електромагнітні властивості середовищ.

4. У скільки разів відрізняються довжини хвиль ультрависоких та низьких частот?

5. Визначити необхідну висоту розміщення антен станцій стільникового зв'язку, розташованих вздовж паралельних доріг, відстань між якими становить  $16\text{км}$ , для забезпечення покриття смуги між дорогами.

6. Визначити внутрішній та зовнішній радіуси другої зони Френеля при роботі радіозасобу на частоті  $30\text{МГц}$  при  $r=400\text{км}$ ;  $r_0=150\text{км}$ .

7. Сторонні випромінювання.

8. При якій концентрації електронів  $N_e$  у максимумі шару  $F_2$  буде прозорою іоносфера для радіохвиль з довжинами  $15\text{м}$  та  $20\text{м}$  при їх вертикальному випромінюванні.?

## Варіант 26

1.	Про що свідчить фазова швидкість у середовищі менша за 300000км/с?	1. Середовище із втратами. 2. Середовище без втрат. 3. Середовище ідеальний діелектрик. 4. Середовище ідеальний провідник. 5. Середовище реальний провідник. 6. Середовище напівпровідник.
----	--	---

2. Проаналізувати демаскуючі ознаки друкованого документу

3. Коефіцієнт розповсюдження.

4. У скільки разів відрізняються довжини хвиль наднизьких та високих частот?

5. На якій відстані може бути прийнятий сигнал радіостанції дециметрового діапазону, яка розміщена на літаку, що летить на висоті 9км?

6. Як зміниться максимальний радіус 1<sup>ї</sup> зони Френеля при зміні відстані між пунктами випромінення і прийому з  $r = 60 \dots \dots$  км до  $r = 100 \dots \dots$  км. Робоча частота  $f = 1$  ГГц.

7. Функціональні сигнали.

8. Визначити глибину проникнення у мідь ЕМХ довжиною  $\lambda = 15$  м. Для яких діапазонів ЕМХ такий шар може бути екраном?

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шейдаков Н.Е., Серпенинов О.В., Тищенко Е.Н. Физические основы защиты информации : учеб. пособие. — М. : РИОР : ИНФРА-М, 2016. — 204 с.
2. Шелупанов А.А., Зайцев А.П., Мещеряков Р.В., Скрыль С.В., Голубятников И.В., Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов. 2009.
3. Сагдеев К.М., Петренко В.И., Чипига А.Ф., Физические основы защиты информации : учеб. пособие. учебное пособие, 2017, 406 с.
4. Поля і хвилі в системах технічного захисту інформації: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Ч.1. / В.М. Шокало, В.А. Усін, Д.В. Грецьких, В.О. Хорошко, Л.П. Крючкова; за заг. ред. В.М. Шокало. – Харків : ХНУРЕ; Колегіум, 2013.