

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

## **ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни  
«Основи електрики та електроніки, електричні  
вимірювання та їх стандартизація»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт  
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

**за темою № 7 - Електромагнітні хвилі**

**Кременчук 2023**

### **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

### **СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

### **ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

**Розробник:** викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

### **Рецензенти:**

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

### **План лекції:**

1. Електромагнітні хвилі у кабелі
2. Стоячі електромагнітні хвилі в антені
3. Вільні електромагнітні хвилі

### **Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті**

#### **Основна:**

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків: Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

#### **Допоміжна:**

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл : у 3 кн. Київ : Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті**

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

## Текст лекції

### 1. Електромагнітні хвилі у кабелі

Розглянемо двопровідну лінію, на вхід якої підключено генератор змінної ЕРС  $\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t$  (рис. 1).

При низьких частотах (НЧ) передачі сигналу вздовж проводів протікає звичайний струм провідності  $i_n$ , який переносить енергію НЧ сигналу споживачеві (рис. 1, а).

На високих частотах (ВЧ) передачі сигналу завдяки швидкій зміні електричного поля між провідниками лінії виникає струм зміщення (подібно до високочастотного струму зміщення через діелектрик конденсатора):

$$i_C = \frac{dq}{dt} = S \frac{d\sigma}{dt} = S \frac{dD}{dt} = S \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot \frac{dE}{dt}.$$

Струм зміщення збуджує електромагнітні хвилі (ЕМВ), які переносять енергію ВЧ сигналу споживачеві (рис. 1, б).

Фізичний механізм цього явища ілюструється на рис.1, б. На початку позитивного напівперіоду коливань, напруга генератора та напруженість електричного поля  $E_1$  на початку лінії у точці  $x_1$  збільшується. Це призводить до зростання струму зміщення  $i_{C1}$  та напруженості магнітного поля  $H_1$ , спрямованого за правилом свердла. Збільшення магнітного поля  $H_1$  викликає появу вихрового електричного поля  $E_2$ , спрямованого так, що його магнітне поле  $H_2$  перешкоджає збільшенню  $H_1$ . Вихрове поле  $E_2$  викликає в точці  $x_2$  струм зміщення  $i_{C2}$ , а, отже, і появу магнітного поля  $H_2$ , а це виникнення поля  $E_3$  в точці  $x_3$  і т.д. В результаті такого процесу поля  $E_1$  і  $H_1$  у точці  $x_1$  знищуються зустрічними полями  $E_2$  та  $H_2$ , і обидва поля переміщуються в точку  $x_2$ . Вихрові поля  $E_3$  і  $H_3$ , що виникають тут, знищують поля  $E_2$  і  $H_2$ , і поля переміщуються в точку  $x_3$  і т.д.

Таким чином, отримуємо, що електричне та магнітне поля взаємно перетворюються, і підтримуючи одне одного, поширюються вздовж лінії у просторі між провідниками.

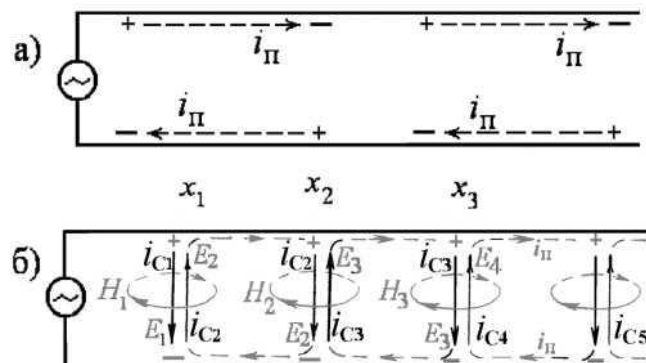


Рисунок 1 – Поширення електричного сигналу в низькочастотному кабелі а) та високочастотному кабелі б)

Цей процес називається поширенням електромагнітного імпульсу.

Якщо на початку лінії напруженість електричного поля змінюється за гармонічним законом і частота коливань досить висока для виникнення струмів

зміщення, то вздовж лінії поширюються біжні електромагнітні хвилі (ЕМХ), які описуються рівняннями:

$$E(x, t) = E_m \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi_0);$$

$$H(x, t) = H_m \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi_0).$$

$k = 2\pi/\lambda$  – хвильове число показує на скільки змінюється фаза на відстані 1 метр між точками, що коливаються

Напрямок векторів  $E$ ,  $H$  і  $v$  в ЕМХ визначається правилом буравчика: якщо ручку буравчика з правою нарізкою обертати від вектора  $E$  до вектора  $H$ , напрям поступального руху гвинта буравчика вкаже напрям  $v$  (див. рис. 2). Оскільки, змінне електричне поле породжує струм зміщення, а він – магнітне поле, то максимуми  $E$  і  $H$  в біжній ЕМХ, збігаються (рис. 2).

Таким чином, існує два процеси передачі електричного сигналу: за допомогою струмів провідності та за допомогою струмів зміщення (ЕМХ).

На низьких частотах переважають струми провідності, які залежать від

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}.$$

активного опору матеріалу провідників кабелю

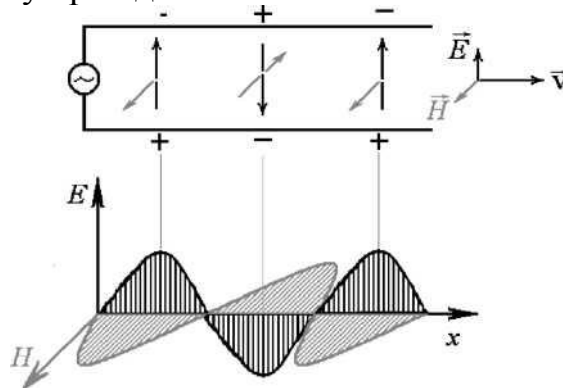


Рисунок 2 – ЕМВ, що біжить, та її графічне уявлення

На високих частотах переважають струми зміщення, і передача електричного сигналу здійснюється ЕМХ, що розповсюджуються у просторі між провідниками. Отже, передача ВЧ сигналу слабо залежить від матеріалу дротів, та визначається хвильовим опором кабелю

$$X_B = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Від нього залежить співвідношення між амплітудами напруженостей електромагнітної хвилі.

Оскільки реальний кабель має активний опір, на якому втрачається частина енергії ЕМХ, то хвиля є загасаючою, і амплітуди напруженостей  $E_m$  і  $H_m$  зменшуються при просуванні ЕМХ.

## 2. Стоячі електромагнітні хвилі в антені

На практиці зазвичай використовуються високочастотні лінії кінцевої довжини, на яких укладається порівняно невелике число довжин хвиль, наприклад, телевізійна антена або антенно-фідерний пристрій радіопередавача.

Початкова хвиля і відбиті від кінців лінії хвилі, складаючись, можуть створювати стоячі ЕМХ.

Стоячі хвилі можуть існувати лише на певних частотах, які називаються гармоніками. Чисельні значення частот гармонік визначаються довжиною лінії та характером відбиття ЕМХ від кінців лінії. Конфігурація стоячої хвилі з найменшою частотою називається основною гармонікою. Всі інші частоти гармонік кратні частоті основної гармоніки. Амплітуда основної гармоніки найбільша.

### 3. Вільні електромагнітні хвилі

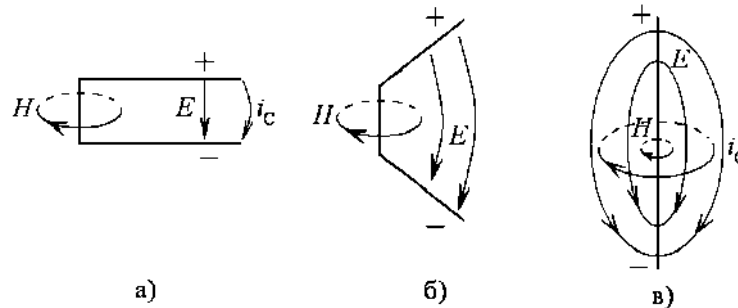


Рисунок 3 – Перехід від двопровідної лінії до відкритого вібратора в)

При розсуненні вільних провідників замкнутої з одного кінця двопровідної лінії отримаємо в межах відрізку прямого дроту, який називається відкритим вібратором (рис. 3) і використовується для збудження вільних ЕМХ.

Пристрій для збудження ЕМХ показано на рис. 4. Змінна напруга із частотою основного коливання вібратора з генератора подається у відкритий вібратор через високочастотний трансформатор. На кінцях вібратора утворюється пучність напруги між кінцями виникають струми зміщення, які створюють змінне електричне поле  $E$  (рис.4). Так само як і в двопровідній лінії (див. рис. 2), навколо струмів зміщення утворюється змінне магнітне поле  $H_1$  і збуджуюче вихрове поле  $E_1$ , спрямоване назустріч  $E$ . Тому поле з точки  $x_1$  переміщується в точку  $x_2$  і т.д. Вільні ЕМХ поширюються від вібратора у всіх напрямках.

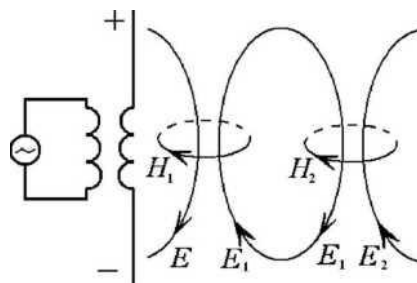


Рисунок 4 – Виникнення ЕМХ

Основні характеристики ЕМХ описуються теорією Максвелла. Для простого випадку плоских ЕМХ, що поширюються в напрямку  $x$ , рівняння Максвелла можна подати у вигляді

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{H}}{\partial x}, \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{E}}{\partial x}.$$

Якщо продиференціювати перше рівняння  $t$  і помножити на  $\mu_0$ , а друге продиференціювати за  $x$ , то права частина першого рівняння і ліва частина другого будуть однакові. Прирівнявши інші частини рівнянь, отримаємо

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}.$$

Аналогічне рівняння неважко здобути і для  $H$ .

Це хвильове рівняння, отже,  $E$  і  $H$  поширюються у просторі у вигляді ЕМХ зі швидкістю

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

де  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – швидкість поширення ЕМХ у вакуумі, де  $\epsilon = \mu = 1$ .

Крім швидкості поширення ЕМХ існує інша важлива характеристика середовища розповсюдження ЕМХ – хвильовий опір

$$X_B = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\epsilon \epsilon_0}},$$

яке, як і просте, вимірюється в Ом. Хвильовий опір вакууму

$$X_B^0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 377 \text{ Ом}$$

Хвильовий опір встановлює однозначний зв'язок між напруженнями електричного та магнітного полів

$$E = H X_B.$$