

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ  
«ОДЕСЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
ОДЕСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ»**

**НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС  
НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**Основи теорії кіл, сигнали та процеси в радіотехніці**

|                                       |                                                                    |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Галузь знань:</b>                  | <b>17 – «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»</b> |
| <b>Спеціальність:</b>                 | <b>172 – «Телекомунікації та радіотехніка»</b>                     |
| <b>Освітньо -професійна програма:</b> | <b>«Телекомунікації та радіотехніка. Робототехніка»</b>            |

**Одеса 2024**

**Укладачі:** Лавріненко Юліан Володимирович, викладач, к.т.н.спеціаліст вищої категорії,  
викладач

---

---

---

(вказати авторів, їхні посади, звання, категорії)

**Програма обговорена та схвалена** на засіданні циклової комісії «Прикладна механіка, телекомунікації та робототехніка»

Протокол № 1 від “30” 08 2024 року

Голова циклової комісії

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Олександр ТИМОШЕВСЬКИЙ

**Міністерство освіти і науки України**

**ВСП "Одеський фаховий коледж комп'ютерних технологій  
Одеського державного екологічного університету"**

(повне найменування вищого навчального закладу)

Циклова комісія Прикладна механіка телекомунікації, робототехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. директора ВСП «ОФККТ  
ОДЕКУ»

\_\_\_\_\_ **Костянтин Мамука**

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ **2024 року**

**НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА**

**Основи теорії кіл, сигнали та процеси в радіотехніці.**

(шифр і назва навчальної дисципліни)

**Галузь знань:** **17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації**  
(шифр і назва напряму підготовки)

**Спеціальність:** **172 Електронні комунікації та радіотехніка**  
(шифр і назва спеціальності)

**Освітня програма:** **Телекомунікації та радіотехніка. Робототехніка.**  
(назва програми)

Одеса – 2024 рік

**Розробники:**

Лавріненко Юліан Володимирович викладач кандидат технічних наук,  
спеціаліст вищої категорії

(вказати авторів, їхні посади, звання, категорії)

**Програма обговорена та схвалена на засіданні циклової комісії**  
Прикладної механіки, телекомунікацій, робототехніки

Протокол № \_\_\_\_ від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

Голова циклової комісії \_\_\_\_\_ Тимошевський О.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

**Програму розглянуто і схвалено** Методичною Радою ВСП «ОФККТ  
ОДЕКУ»

Протокол № \_\_\_\_ від. “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

Голова Методичної Ради коледжу \_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

**Переглянуто:**

Протокол № \_\_\_\_ від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_\_ року

Голова циклової комісії \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

© Лавріненко Ю.В., 2024 рік

## 1. Загальний опис освітньої компоненти

|                                        |                                                                                                                                |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Галузь знань                           | 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації                                                                        |
| Спеціальність                          | 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»                                                                                   |
| Освітньо-кваліфікаційний ступінь       | Фаховий молодший бакалавр                                                                                                      |
| Компонента освітньої програми          | Обов'язкова                                                                                                                    |
| Кількість кредитів                     | 6                                                                                                                              |
| Загальна кількість годин               | 180                                                                                                                            |
| Рік підготовки                         | 2                                                                                                                              |
| Семестр                                | 4                                                                                                                              |
| Види навчальних занять                 | Лекція, практичне, лабораторне, самостійне, індивідуальне.                                                                     |
| Засоби діагностики успішності навчання | Поточне усне опитування, тести проміжного контролю, оцінювання завдань самостійної та індивідуальної роботи. Контрольна робота |
| Вид контролю                           | Залік                                                                                                                          |
| Мова навчання                          | Українська                                                                                                                     |

## 2. Мета, завдання, компетентності та результати навчання:

### Метою викладення навчальної дисципліни є:

формування і конкретизація знань з електротехніки та електроніки з метою застосування отриманої інформації для вирішення професійних завдань в області технічної експлуатації радіотехнічного обладнання комп'ютерних мереж.

Вивчення основ теорії сигналів та їх спектрів з метою застосування отриманої інформації для вирішення професійних завдань в області експлуатації радіотехнічного обладнання комп'ютерних мереж.

### Завданням навчальної дисципліни є:

сформувати у студента знання основних законів електротехніки і методів аналізу електричних та магнітних кіл; знання електротехнічної термінології; знання принципів дії, конструкції, властивостей, галузей використання основних електротехнічних, електронних і електровимірювальних приладів, проведення експериментальних вимірювань параметрів, керування ними і контролю за їх роботою.

дати студентам знання про вид та параметри основних сигналів та їх спектрів, що застосовуються в радіотехнічних системах; використовуваної термінології; конструкції, принципів дії, властивостей приладів діапазону НВЧ та основних схем радіотехнічних пристроїв (РТП),

Міждисциплінарні зв'язки: вивчення базується на знаннях, одержаних студентами по предметах "Загальна фізика", "Вища математика", "Матеріалознавство РЕЗ та елементна база РЕА".

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми в процесі вивчення дисципліни **«Основи теорії кіл, сигнали та процеси в радіотехніці»** здобувачі передвищої фахової освіти повинні набути наступні програмні компетентності та результати навчання:

**- загальні компетентності:**

ЗК6. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК8. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

**- спеціальні (фахові) компетентності:**

СК6. Здатність до виявлення типових несправностей телекомунікаційного і радіотехнічного обладнання за результатами інструментальних вимірювань.

**- програмні результати навчання:**

РН2. Знати основні поняття математики, фізичні закони та явища, основ електротехніки, необхідні для подальшого навчання та професійної діяльності.

РН3. Знати основні способи формування, перетворення, обробки та передачі сигналів та їх характеристики.

### **3. Програма навчальної дисципліни.**

#### **Розділ 1. Загальна електротехніка**

**Тема 1.1 Електричні кола** Основні поняття і закони електричних кіл. Поняття про електричний струм, електричні кола, їх графічне зображення, структуру. Послідовне, паралельне і змішане з'єднання, елементів, розрахунок еквівалентного опору. Закони Ома і Кірхгофа.

**Тема 1.2 Електричні кола постійного струму.** Застосування законів Ома і Кірхгофа для розрахунку кіл постійного струму. Особливості розрахунку складних електричних кіл. Методи контурних струмів і вузлових потенціалів. Метод суперпозиції. Потужність в колах постійного струму.

**Тема 1.3. Електричні кола змінного струму.** Поняття про синусоїдальний струм. Виробництво синусоїдальної ЕРС. Миттєві, діючі і середні значення синусоїдальних ЕРС, струмів і напруг. Резистори, конденсатори, котушки індуктивності в колах змінного струму. Однофазні електричні кола. Закони Ома і Кірхгофа в колах змінного струму. Векторні зображення синусоїдального струму. Резонансні явища в колах змінного струму. Символічний метод розрахунку. Основні закони електротехніки в комплексному вигляді. Трикутники опорів і провідності. Активна, реактивна і повна потужності в колах змінного струму. Коефіцієнт потужності.

**Тема 1. 4. Трифазні кола.** Виробництво трифазної ЕРС. Поняття про лінійні і фазні параметри. З'єднання обмоток трифазного генератора і фаз споживача "зіркою" "трикутником". Розрахунок трифазних кіл при симетричному і несиметричному навантаженнях. Потужності в трифазних колах. Коефіцієнт потужності його важливість для ефективності енергогосподарства

## **Розділ 2. Магнітні кола**

**Тема 2. 1 Магнітні кола.** Основні параметри і характеристики. Порядок розрахунку магнітних кіл.

**Тема 2.2 Трансформатори.** Призначення і класифікація, галузі застосування трансформаторів. Будова і принцип дії однофазного трансформатора. Основний магнітний потік і потокозчеплення розсіювання. Коефіцієнт трансформації. Рівняння електричної рівноваги кіл первинної і вторинної обмоток. Рівняння намагнічуючих сил і співвідношення між струмами обмоток трансформатора.

## **Розділ 3. Спеціальні електричні кола**

**Тема 3.1 Електричні кола з розподіленими параметрами,** Електричні кола з розподіленими параметрами, поняття погонних емністей, індуктивності і опору. Характеристичний опер і поняття погоджувального режиму в довгій лінії.

**Тема 3.2. Рижим роботи довгих ліній. Рижим біжучої хвили в довгій лінії. Рижим стоячої хвили в довгій лінії. Рижим змішаної хвили довгій лінії.**

**Тема 3.3. Елементи техніки надзвичайних частот. Радіочастотні кабелі, хвилеводи, трійники, мости, ізолятори.**

**Тема 3.4. Нелінійні електричні кола.** Поняття нелінійних електричних кіл змінного струму. Кола, що диференціює та інтегруючі кола

несинусоїдального струму. Кола послідовного та паралельного обмеження сигналів.

## **Розділ 4.**

### **Перехідні процеси в електричних колах.**

**Тема 4.1. Перехідний процес.** Поняття перехідного процесу в електричному колі. Перший та другий закони комутації.

**Тема 4.2. Перехідний процес в колах першого порядку .** Перехідний процес в електричному LR- колі та CR- колі при підключенні джерела постійного струму та при короткому замиканні.

## **Розділ 5**

### **Загальна інформація про сигнали.**

**Тема 5.1** Загальні відомості про сигнали. Електричні сигнали.

**Тема 5.2** Характеристика безперервного гармонійного сигналу.  
Характеристика імпульсного поодинокого і періодичного сигналів.  
Характеристика квантованого, дискретно-квантованого і цифрового сигналів.

**Тема 5.3** Поняття модуляції сигналу, види модуляції. Амплітудна модуляція. Кутова модуляція сигналу. Імпульсна модуляція сигналу : амплітудно-імпульсна, часово-імпульсна, широко-імпульсна. Спеціальні види модуляції.

**Тема 5.4** Поняття детектування сигналу, амплітудне детектування. Частотне детектування сигналів. Фазове детектування сигналів.

## **Розділ 6**

### **Спектри сигналів.**

**Тем 6.1** Спектральне представлення сигналів. Перетворення Фур'є, ряд Фур'є.

**Тема 6.2** Амплітудний і фазовий спектри монохроматичного і амплітудно-модульованого сигналу та частотно-модульованого сигналу.

**Тем 6.3** Амплітудний і фазовий спектри періодичних сигналів.

**Тема 6.4** Амплітудний і фазовий спектри поодиноких прямокутних відео- і радіоімпульсів.

#### **4. Рекомендована література**

##### **Базова**

1. Баскаков С.І. Радіотехнічні ланцюги з розподіленими параметрами: навчальний посібник - М: Радіо та зв'язок 2012 – 175с.
2. Мурзін В.К. Загальна електротехніка. – Полтава – Кременчук, 2001. – 323 с.
3. Гончаренко, Б. М. Електроніка та мікросхемна техніка : **конспект лекцій** для студентів спец. 6.092501 -

##### **Допоміжна**

- 1 . <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/tool/print/index.php?id=23040>
2. [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/6bilynskyj\\_elektronni\\_systemy/3.htm3](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/6bilynskyj_elektronni_systemy/3.htm3).
3. <https://www.studmed.ru> › baskakov-radiotekhnicheskie- circuits with distributed parameters.
4. <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=32479>
5. Електроніка та мікросхемотехніка : конспект лекцій – eNUFTIR  
<http://dSPACE.nuft.edu.ua> › jsui

**Міністерство освіти і науки України**

ВСП "Одеський фаховий коледж комп'ютерних технологій

Одеського державного екологічного університету"

(повне найменування вищого навчального закладу)

Циклова комісія Прикладна механіка (електромеханіка), телекомунікації,  
робототехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Заступник директора  
з навчальної роботи

\_\_\_\_\_ **Ю.В. Бігунова**

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ **2024 року**

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

Основи теорії кіл, сигнали та процеси в радіотехніці.

(шифр і назва навчальної дисципліни)

**Галузь знань:** 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
(шифр і назва напрямку підготовки)

**Спеціальність:** 172 Електронні комунікації та радіотехніка  
(шифр і назва спеціальності)

**Освітня програма:** Телекомунікації та радіотехніка. Робототехніка.  
(назва програми)

**Одеса – 2024 рік**

**Розробники:**

Лавріненко Юліан Володимирович викладач кандидат технічних наук, спеціаліст вищої категорії

(вказати авторів, їхні посади, звання, категорії)

**Програма обговорена та схвалена на засіданні циклової комісії**

Прикладної механіки, телекомунікацій, робототехніки

Протокол № \_\_\_\_ від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

Голова циклової комісії \_\_\_\_\_ Тимошевський О.В \_\_\_\_\_

(підпис)

(прізвище та ініціали)

**Програму розглянуто і схвалено Методичною Радою ВСП «ОФККТ ОДЕКУ»**

Протокол № \_\_\_\_ від. “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

Голова Методичної Ради коледжу \_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

**Переглянуто:**

Протокол № \_\_\_\_ від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_\_ року

Голова циклової комісії \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

© Лавріненко Ю.В., 2024 рік

1. Опис навчальної дисципліни

| Найменування показників      | Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень           | Характеристика навчальної дисципліни |                       |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
|                              |                                                                            | денна форма навчання                 | заочна форма навчання |
| Кількість кредитів – 6       | Галузь знань<br><u>17 Електроніка та телекомунікації</u><br>(шифр і назва) | <i>Обов'язкова</i>                   |                       |
| Загальна кількість годин 180 | Спеціальність (професійне спрямування):                                    | <b>Рік підготовки:</b>               |                       |
|                              |                                                                            | 2-й                                  | 2-й                   |
|                              |                                                                            | <b>Семестр</b>                       |                       |

|                                                                                                        |                                                                          |                                        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------|
|                                                                                                        | <u>172 Телекомунікації та радіотехніка</u>                               | 4-й                                    | 4-й    |
|                                                                                                        |                                                                          | <b>Лекції</b>                          |        |
| Тижневих годин для денної форми навчання:<br><br>аудиторних – 6<br><br>самостійної роботи студента – 3 | Освітньо-кваліфікаційний рівень:<br><br><u>Фаховий молодший бакалавр</u> | 60 год.                                | 14     |
|                                                                                                        |                                                                          | <b>Практичні, семінарські</b>          |        |
|                                                                                                        |                                                                          | 20 год .                               | 10 год |
|                                                                                                        |                                                                          | <b>Лабораторні</b>                     |        |
|                                                                                                        |                                                                          | 10 год.                                | 4 год. |
|                                                                                                        |                                                                          | <b>Самостійна робота</b>               |        |
|                                                                                                        |                                                                          | 90 год.                                | 136    |
|                                                                                                        |                                                                          | <b>Індивідуальні завдання:</b><br>год. |        |
|                                                                                                        |                                                                          | <b>Вид контролю:</b> залік             |        |

## 2. Мета, завдання, компетентності та результати навчання :

### Метою викладення навчальної дисципліни є:

вивчення основ теорії електричних кіл, їх параметри та властивості, а також, сигналів та їх спектрів з метою застосування отриманої інформації для вирішення професійних завдань в області експлуатації радіотехнічного обладнання комп'ютерних мереж.

### Завданням навчальної дисципліни є:

дати студентам знання основ теорії електричних кіл і про вид та параметри основних сигналів та їх спектрів, що застосовуються в радіотехнічних системах; використовуваної термінології; конструкції, принципів дії, властивостей приладів діапазону НВЧ.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми в процесі вивчення дисципліни «Основи теорії кіл, сигнали та процеси в радіотехніці» здобувачі передвищої фахової освіти повинні набути наступні програмні компетентності та результати навчання:

**- загальні компетентності:**

ЗК6. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК8. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

**- спеціальні (фахові) компетентності:**

СК6. Здатність до виявлення типових несправностей телекомунікаційного і радіотехнічного обладнання за результатами інструментальних вимірювань.

**- програмні результати навчання:**

РН2. Знати основні поняття математики, фізичні закони та явища, основ електротехніки, необхідні для подальшого навчання та професійної діяльності.

РН3. Знати основні способи формування, перетворення, обробки та передачі сигналів та їх характеристики.

### **3. Програма навчальної дисципліни.**

#### **Розділ 1. Загальна електротехніка**

**Тема 1.1 Електричні кола** Основні поняття і закони електричних кіл. Поняття про електричний струм, електричні кола, їх графічне зображення, структуру. Послідовне, паралельне і змішане з'єднання, елементів, розрахунок еквівалентного опору. Закони Ома і Кірхгофа.

**Тема 1.2 Електричні кола постійного струму.** Застосування законів Ома і Кірхгофа для розрахунку кіл постійного струму. Особливості розрахунку складних електричних кіл. Потужність в колах постійного струму.

**Тема 1.3. Електричні кола змінного струму.** Поняття про синусоїдальний струм. Виробництво синусоїдальної ЕРС. Миттєві, діючі і

середні значення синусоїдальних ЕРС, струмів і напруг. Резистори, конденсатори, котушки індуктивності в колах змінного струму. Однофазні електричні кола. Закони Ома і Кірхгофа в колах змінного струму. Векторні зображення синусоїдального струму. Резонансні явища в колах змінного струму. Основні закони електротехніки в комплексному вигляді. Трикутники опорів і провідності. Активна, реактивна і повна потужності в колах змінного струму. Коефіцієнт потужності.

**Тема 1. 4. Трифазні кола.** Виробництво трифазної ЕРС. Поняття про лінійні і фазні параметри. З'єднання обмоток трифазного генератора і фаз споживача "зіркою" "трикутником". Розрахунок трифазних кіл при симетричному навантаженні. Потужності в трифазних колах. Коефіцієнт потужності його важливість для ефективності енергогосподарства

## **Розділ 2. Магнітні кола**

**Тема 2. 1 Магнітні кола.** Основні параметри і характеристики. Порядок розрахунку магнітних кіл.

**Тема 2.2 Трансформатори.** Призначення і класифікація, галузі застосування трансформаторів. Будова і принцип дії однофазного трансформатора. Основний магнітний потік і потокозчеплення розсіяння. Коефіцієнт трансформації. Рівняння електричної рівноваги кіл первинної і вторинної обмоток. Співвідношення між струмами обмоток трансформатора.

## **Розділ 3. Спеціальні електричні кола**

**Тема 3.1** Електричні кола з розподіленими параметрами, Електричні кола з розподіленими параметрами, поняття погонних емністей, індуктивності і опору. Характеристичний опер і поняття погоджувального режиму в довгій лінії.

**Тема 3.2.** Режим роботи довгих ліній. Режим біжучої хвилі в довгій лінії. Режим стоячої хвилі в довгій лінії. Режим змішаної хвилі довгій лінії.

**Тема 3.3.** Елементи техніки надзвичайних частот. Радіочастотні кабелі, хвилеводи, трійники, мости, ізолятори.

**Тема 3.4. Нелінійні електричні кола.** Поняття нелінійних електричних кіл змінного струму. Кола, що диференціює та інтегруючі кола

несинусоїдального струму. Кола послідовного та паралельного обмеження сигналів.

## **Розділ 4.**

### **Перехідні процеси в електричних колах.**

**Тема 4.1. Перехідний процес.** Поняття перехідного процесу в електричному колі. Перший та другий закони комутації.

**Тема 4.2. Перехідний процес в колах першого порядку .** Перехідний процес в електричному LR- колі та CR- колі при підключенні джерела постійного струму та при короткому замиканні.

## **Розділ 5**

### **Загальна інформація про сигнали.**

**Тема 5.1** Загальні відомості про сигнали. Електричні сигнали.

**Тема 5.2** Характеристика безперервного гармонійного сигналу.  
Характеристика імпульсного поодинокого і періодичного сигналів.  
Характеристика квантованого, дискретно-квантованого і цифрового сигналів.

**Тема 5.3** Поняття модуляції сигналу, види модуляції. Амплітудна модуляція.  
Кутова модуляція сигналу. Імпульсна модуляція сигналу :  
амплітудно-імпульсна, часово-імпульсна, широко-імпульсна. Спеціальні види модуляції.

**Тема 5.4** Поняття детектування сигналу, амплітудне детектування. Частотне детектування сигналів. Фазове детектування сигналів.

## **Розділ 6**

### **Спектри сигналів.**

**Тем 6.1** Спектральне представлення сигналів. Перетворення Фур'є, ряд Фур'є.

**Тема 6.2** Амплітудний і фазовий спектри монохроматичного і амплітудно-модульованого сигналу та частотно-модульованого сигналу.

**Тем 6.3** Амплітудний і фазовий спектри періодичних сигналів.

**Тема 6.4** Амплітудний і фазовий спектри поодиноких прямокутних відео- і радіоімпульсів.

#### 4 . Структура навчальної дисципліни

| 6                                                                                                              | Кількість годин |              |   |     |     |      |              |              |    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|---|-----|-----|------|--------------|--------------|----|----|
|                                                                                                                | денна форма     |              |   |     |     |      | Заочна форма |              |    |    |
|                                                                                                                | усьог<br>о      | у тому числі |   |     |     |      | усьог<br>го  | у тому числі |    |    |
|                                                                                                                |                 | л            | п | лаб | Інд | с.р. |              | л            | п  | з  |
| 1                                                                                                              | 2               | 3            | 4 | 5   | 6   | 7    | 8            | 9            | 10 | 11 |
| <b>Розділ I Общая електротехніка</b>                                                                           |                 |              |   |     |     |      |              |              |    |    |
| <b>Тема 1.1 Електричні кола.</b> Задачі та стислий зміст дисципліни. Основні поняття і закони електричних кіл. | 8               | 4            |   |     |     | 4    | 4            | 2            |    |    |
| <b>Тема 1.2 Електричні кола постійного струму.</b> Застосування законів Ома і Кірхгофа для розрахунку кіл      | 18              | 6            | 2 | 2   |     | 8    | 6            |              |    |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |   |   |   |  |   |    |   |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---|---|---|--|---|----|---|--|--|
| постійного струму.<br>Потужність в колах<br>постійного струму.                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |   |   |   |  |   |    |   |  |  |
| <b>Тема 1.3 Електричні<br/>кола змінного<br/>струму.</b> Поняття про<br>синусоїдальний струм.<br><br>Однофазні електричні<br>кола. Векторні зображення<br>синусоїдального струму.<br>Резонансні явища в колах<br>змінного струму. Активна,<br>реактивна і повна<br>потужності в кола<br>змінного струму.<br>Коефіцієнт потужності. | 18 | 6 | 2 | 2 |  | 8 | 16 |   |  |  |
| <b>Тема 1.4 Трифазні кола.</b><br>Поняття про лінійні і<br>фазні параметри.<br>З'єднання обмоток<br>трифазного генератора і<br>фаз споживача "зіркою"<br>"трикутником".<br>Потужності в трифазних<br>колах.                                                                                                                        | 14 | 4 | 2 | 2 |  | 6 | 20 |   |  |  |
| <b>Розділ II. Магнітні кола.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |   |   |   |  |   |    |   |  |  |
| <b>Тем 2.1 Магнітні кола.</b><br>Основні параметри і<br>характеристики. Порядок<br>розрахунку магнітних кіл.                                                                                                                                                                                                                       | 8  | 2 | 2 |   |  | 4 | 10 | 2 |  |  |
| <b>Тема 2.2<br/>Трансформатори.</b> Призна<br>чення і класифікація.<br>Будова і принцип дії                                                                                                                                                                                                                                        | 8  | 2 |   | 2 |  | 4 | 8  |   |  |  |

|                                                                                                                                                                                                                        |    |   |   |   |  |   |    |   |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---|---|---|--|---|----|---|--|--|
| однофазного трансформатора.<br>Коефіцієнт трансформації.<br>трансформатора.                                                                                                                                            |    |   |   |   |  |   |    |   |  |  |
| <b>Розділ III. Спеціальні електричні кола</b>                                                                                                                                                                          |    |   |   |   |  |   |    |   |  |  |
| <b>Тема 3.1 Електричні кола з розподіленими параметрами.</b> Поняття погонних емністей, індуктивності і опору. Характеристичний опер і поняття погоджувального режиму в довгій лінії                                   | 10 | 4 | 2 |   |  | 4 | 8  | 2 |  |  |
| <b>Тема 3.2. Рижим роботи довгих ліній.</b> Рижими біжучої хвили, стоячої хвили, змішаної хвили довгій лінії.                                                                                                          | 10 | 4 | 2 |   |  | 4 | 10 |   |  |  |
| <b>Тема 3.3. Елементи техніки надзвичайних частот.</b>                                                                                                                                                                 | 6  | 2 |   |   |  | 4 | 12 |   |  |  |
| <b>Тема 3.4 Нелінійні електричні кола.</b> Поняття нелінійних електричних кіл змінного струму. Кола, що диференціює та інтегруючі кола несинусоїдального струму. Кола послідовного та паралельного обмеження сигналів. | 10 | 4 |   | 2 |  | 4 | 12 |   |  |  |
| <b>Розділ IV. Перехідні процеси в електричних колах.</b>                                                                                                                                                               |    |   |   |   |  |   |    |   |  |  |

|                                                                                                                                                                                          |    |   |   |  |  |   |   |   |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---|---|--|--|---|---|---|--|
| <b>Тема 4.1. Перехідний процес.</b> Поняття перехідного процесу в електричному колі. Перший та другий закони комутації.                                                                  | 8  | 2 | 2 |  |  | 4 | 4 | 2 |  |
| <b>Тема 4.2. Перехідний процес в колах першого порядку .</b> Перехідний процес в електричному LR- колі та CR- колі при підключенні джерела постійного струму та при короткому замиканні. | 10 | 4 | 2 |  |  | 4 | 8 |   |  |
| <b>Розділ V. Загальна інформація про сигнали.</b>                                                                                                                                        |    |   |   |  |  |   |   |   |  |
| <b>Тема 5.1 Загальні відомості про сигнали.</b> Електричні сигнали                                                                                                                       | 6  | 2 |   |  |  | 4 | 4 | 2 |  |
| <b>Тема 5.2 Характеристика сигналів.</b>                                                                                                                                                 | 6  | 2 |   |  |  | 4 | 6 |   |  |
| <b>Тема 5.3 Поняття модуляції сигналу.</b> Види модуляції. Амплітудна, кутова, імпульсна модуляція сигналу. Спеціальні види модуляції.                                                   | 8  | 2 | 2 |  |  | 4 | 8 |   |  |
| <b>Тема 5.4 Поняття детектування сигналу.</b> Амплітудне, частотне, фазове детектування сигналів                                                                                         | 6  | 2 |   |  |  | 4 | 6 |   |  |
| <b>Розділ VI. Спектри сигналів.</b>                                                                                                                                                      |    |   |   |  |  |   |   |   |  |

**5 . Теми**

|                                                                                                                                                   |            |           |           |           |  |           |            |           |           |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|--|-----------|------------|-----------|-----------|--|
| <b>Тема 6.1. Спектральне представлення сигналів.</b><br>Перетворення Фур'є, ряд Фур'є.                                                            | 6          | 2         |           |           |  | 4         | 8          | 2         |           |  |
| <b>Тема 6.2. Амплітудний і фазовий спектри.</b><br>Спектри монохроматичного і амплітудно-модульованого сигналу та частотно-модульованого сигналу. | 6          | 2         |           |           |  | 4         | 8          |           |           |  |
| <b>Тема 6.3. Амплітудний і фазовий спектри періодичних сигналів</b>                                                                               | 8          | 2         | 2         |           |  | 4         | 12         |           |           |  |
| <b>Тема 6.4 Амплітудний і фазовий спектри поодиноких прямокутних відео- і радіоімпульсів.</b>                                                     | 6          | 2         |           |           |  | 4         | 10         |           |           |  |
| <b>Разом</b>                                                                                                                                      | <b>180</b> | <b>60</b> | <b>20</b> | <b>10</b> |  | <b>90</b> | <b>180</b> | <b>14</b> | <b>10</b> |  |

**лекційних занять.**

| №№<br>занят | №№<br>Лекц | Назва теми                                                                                                                                                         | К-сть<br>год. | Літер. |
|-------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------|
| 1           | 1          | Задачі та стислий зміст дисципліни.<br>Електричні кола, їх графічне зображення, структура. електричний струм,                                                      | 2             | [1,4]  |
| 2           | 2          | Основні елементи електричних кіл, послідовне, паралельне і змішане з'єднання, елементів, Закони Ома і Кірхгофа                                                     | 2             | [1,4]  |
| 3           | 3          | Електричні кола змінного струму. Поняття про синусоїдальний струм. Виробництво синусоїдальної ЕРС. Миттєві, діючі і середні значення синусоїдальних ЕРС, струмів і | 2             | [1,4]  |

|    |    |                                                                                                                                                             |   |       |
|----|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------|
|    |    | напруг. Векторні зображення синусоїдального струму.                                                                                                         |   |       |
| 4  | 4  | Резистори, конденсатори, котушки індуктивності в колах змінного струму. Трикутники опорів і провідності.                                                    | 2 | [1,4] |
| 5  | 5  | Однофазні електричні кола. Закони Ома і Кірхгофа в колах змінного струму.                                                                                   | 2 | [1,4] |
| 6  | 6  | . Резонансні явища в колах змінного струму.                                                                                                                 | 2 | [1,4] |
| 7  | 7  | Активна, реактивна і повна потужності в колах змінного струму. Коефіцієнт потужності.                                                                       | 2 | [1,4] |
| 8  | 8  | Трифазні кола. Виробництво трифазної ЕРС. Поняття про лінійні і фазні параметри.                                                                            | 2 | [1,3] |
| 9  | 9  | З'єднання обмоток трифазного генератора і фаз споживача "зіркою" та «трикутником»                                                                           | 2 | [1,3] |
| 10 | 10 | Потужності в трифазних колах. Коефіцієнт потужності його важливість для ефективності енергогосподарства                                                     | 2 | [1,3] |
| 13 | 11 | Магнітні кола. Основні параметри і характеристики. Порядок розрахунку магнітних кіл.                                                                        | 2 | [1,3] |
| 14 | 12 | Трансформатори. Призначення і класифікація, галузі застосування трансформаторів. Будова і принцип дії однофазного трансформатора. Коефіцієнт трансформації. | 2 | [1,3] |
| 20 | 13 | Електричні кола з розподіленими параметрами, поняття погонних емністей, індуктивності і опору.                                                              | 2 | [2,5] |
| 21 | 14 | Поняття характеристичного опору.                                                                                                                            | 2 | [2,5] |
| 22 | 15 | Рижим роботи довгих ліній. Рижим біжучої та стоячої хвилі в довгій лінії.                                                                                   | 2 | [2,5] |
| 23 | 16 | Рижим роботи довгих ліній. Рижим змішаної хвилі.                                                                                                            | 2 | [2,5] |
| 24 | 17 | Елементи техніки надзвичайних частот, ВЧ-кабели, хвилеводи, трійники, мости, ізолятори.                                                                     | 2 | [2,5] |
| 27 | 18 | Нелінійні електричні кола. Поняття нелінійних електричних кіл змінного струму. Кола, що диференціює та інтегруючі кола несинусоїдального струму.            | 2 | [1,3] |

|    |    |                                                                                                                                                    |    |       |
|----|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-------|
| 28 | 19 | Нелінійні електричні кола. Кола послідовного та паралельного обмеження сигналів.                                                                   | 2  | [1,3] |
| 31 | 20 | Перехідний процес. Поняття перехідного процесу в електричному колі. Перший та другий закони комутації.                                             | 2  | [2,3] |
| 32 | 21 | Перехідний процес в колах першого порядку<br>Перехідний процес в електричному LR- колі                                                             | 2  | [2,3] |
| 33 | 22 | Перехідний процес в колах першого порядку<br>Перехідний процес в електричному CR- колі                                                             | 2  | [2,3] |
| 36 | 23 | Загальні відомості про сигнали. Електричні сигнали. Характеристика безперервного гармонійного сигналу.                                             | 2  | [6]   |
| 37 | 24 | Характеристика імпульсного поодинокого і періодичного сигналів, квантованого, дискретно-квантованого і цифрового сигналів.                         | 2  | [6]   |
| 38 | 25 | Поняття модуляції сигналу, види модуляції. Амплітудна модуляція. Кутова модуляція сигналу, імпульсна модуляція сигналу. Спеціальні види модуляції. | 2  | [6]   |
| 40 | 26 | Поняття детектування сигналу, амплітудне детектування, частотне детектування сигналів. Фазове детектування сигналів.                               | 2  | [6]   |
| 41 | 27 | Спектральне представлення сигналів. Перетворення Фур'є, ряд Фур'є.                                                                                 | 2  | [7]   |
| 42 | 28 | Амплітудний і фазовий спектри монохроматичного сигналу та модульованого сигналу                                                                    | 2  | [7]   |
| 43 | 29 | Амплітудний і фазовий спектри послідовності прямокутних відеоімпульсів та радіоімпульсів                                                           | 2  | [7]   |
| 44 | 30 | Амплітудний і фазовий спектри поодиноких прямокутних відеоімпульсів та радіоімпульсів                                                              | 2  | [7]   |
|    |    | Разом                                                                                                                                              | 60 |       |

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ  
«ОДЕСЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
ОДЕСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ»**

# **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**Основи теорії кіл, сигнали та процеси в радіотехніці**

|                                       |                                                                    |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Галузь знань:</b>                  | <b>17 – «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»</b> |
| <b>Спеціальність:</b>                 | <b>172 – «Телекомунікації та радіотехніка»</b>                     |
| <b>Освітньо -професійна програма:</b> | <b>«Телекомунікації та радіотехніка. Робототехніка»</b>            |

**Одеса 2024**

**Укладачі:** Лавріненко Юліан володимирович, викладач, спеціаліст вищої категорії, к.т.н.

---

---

---

(вказати авторів, їхні посади, звання, категорії)

**Програма обговорена та схвалена** на засіданні циклової комісії «Прикладна механіка, телекомунікації та робототехніка»

Протокол № 1 від “30” 08 2024 року

Голова циклової комісії

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр ТИМОШЕВСЬКИЙ

## **Лекція 1.**

**Тема:** Задачі та стислий зміст дисципліни. Електричні кола, їх графічне зображення, структура. електричний струм.

**Мета:** Вивчити елементи електричних кіл та їхні графічні зображення

**Запитання лекції:**

1. Елементи електричних кіл
2. Графічні зображення елементів електричних кіл
3. Дії електричного струму.
4. Основні параметри елементів.

### **Елементи електричних кіл та їхні графічні зображення**

Електричне коло, в залежності від характеру протікаючого в ньому струму називають: «електричне коло постійного струму» або «електричне коло змінного струму». Якщо потрібне уточнення, тоді говорять «електричне коло синусоїдного (несинусоїдного) струму».

Електричні кола постійного і змінного струмів розрізняють також за способом з'єднання їхніх елементів – нерозгалужені та розгалужені кола, за числом джерел електричної енергії – кола з одним і декількома джерелами електричної енергії. Електричне коло, що складається з лінійних елементів, називають лінійним колом. Електричне коло, до якого входить хоча би один нелінійний елемент, називають нелінійним колом. Приймачі електричної енергії як елементи електричного кола мають властивості поглинати електричну енергію з кола та перетворювати її на інші види енергії (необоротний процес), створювати свої магнітні та електричні поля, енергії яких можуть накопичуватися і за певних умов повертатися назад у коло (оборотний процес). Щоб характеризувати ці властивості, вводять поняття параметрів елемента. У числі параметрів елементів кола розрізняють опір, індуктивність та ємність.

Опір ( $R$ ) – параметр, що характеризує властивість елемента поглинати енергію з електричного кола та перетворювати її на інші види енергії (теплову або світлову). Одиницею виміру опору є Ом.

Властивість елемента кола створювати власне магнітне поле (поле самоіндукції), коли в ньому є електричний струм, характеризують параметром індуктивності ( $L$ ). Його називають коефіцієнтом самоіндукції і вимірюють у Генрі (Гн).

Ємність ( $C$ ) – параметр, що характеризує властивість елемента накопичувати заряди або збуджувати ними електричне поле.

Основну властивість джерела електричної енергії – здатність створювати та підтримувати різницю потенціалів на окремих ділянках кола, а також збуджувати та підтримувати електричний струм у замкнутому колі – характеризують його електрорушійною силою (ЕРС).

Проходження струму джерелом супроводжується втратою енергії всередині джерела на нагрів. Ці втрати характеризують параметром опору  $R$ . Тому параметр опору поряд з ЕРС є важливим параметром джерела. У деяких випадках у джерелах змінного струму враховують також параметр індуктивності  $L$ .

Елементи кола, роботу яких можна описати за допомогою параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $M$  і  $C$ , називають пасивними. Елементи кола, для опису роботи яких, крім пасивних параметрів, необхідно вводити ЕРС або струм, називають активними. Елементи кола, які мають тільки один параметр, називаються ідеальними. Ідеальне джерело ЕРС має тільки параметр  $E$ , ідеальне джерело струму – тільки параметр  $J$ , ідеальний індуктивний елемент (ідеальна індуктивна котушка) – тільки параметр  $L$ , ідеальний ємнісний елемент (ідеальний конденсатор) – тільки параметр  $C$ ; тільки один параметр опору  $R$  має резистивний елемент (резистор).

Джерела електричної енергії розділяють на джерела ЕРС і джерела струму.

Якщо у схемі кола внутрішній опір джерела електричної енергії  $R_0$  малий у порівнянні з опором навантаження  $R_n$ , то справедлива нерівність  $R_0 \cdot I \ll E$ . У цьому випадку напруга між виводами джерела електричної енергії практично не залежить від струму, тобто  $U = E = \text{const}$ , і джерело називається джерелом ЕРС.

Джерело з малим внутрішнім опором можна замінити ідеалізованою моделлю в якій  $R_0 = 0$ . Таке джерело називають ідеальним джерелом ЕРС з одним параметром  $E = U$ .

Джерело з великим внутрішнім опором можна замінити ідеалізованою моделлю, в якій  $R_0 = \infty$  і  $E = \infty$ , для якої є справедливим вираз  $E/R_0 = J$ . Таке джерело називають ідеальним джерелом струму з одним параметром  $J$ . Струм джерела струму не залежить від напруги на його вихідних затискачах, а його зовнішня характеристика має вигляд прямої  $I = J = \text{const}$ .

Якщо в схемі кола внутрішній опір джерела електричної енергії на багато разів більше опору навантаження ( $R_0 \gg R_n$ ), то його струм

$$I = E/(R_0 + R_n) \approx E/R_0 = J = \text{const}$$

не залежить від опору навантаження і джерело називається джерелом струму.

Графічне зображення електричного кола за допомогою умовних позначень його елементів називають схемою кола.

Вивчення властивостей електричного кола і його елементів з урахуванням усіх параметрів є досить складним, тому для спрощення аналізу реальне коло представляють його моделлю – набором ідеальних елементів. Графічне зображення кола, в якому замість реальних представлено ідеальні елементи, називають схемою заміщення кола.

Ідеальні елементи в схемі заміщення дозволяють врахувати параметри, які суттєво впливають на фізичні процеси в колі. Параметри реальних елементів, що не мають істотного впливу на фізичні процеси, при цьому не враховують.

Той самий елемент кола може бути зображений різними схемами заміщення залежно від того, для яких цілей ця схема призначена. Наприклад, індуктивну котушку в колі постійного струму для врахування її нагріву подають у схемі заміщення тільки одним резистивним елементом. Але при вивченні фізичних процесів у котушці із змінними струмами її представляють послідовно з'єднаними резистивним і індуктивним ідеальними елементами. А у випадку роботи котушки в колах високої частоти для неї складають схему заміщення з резистивного, індуктивного і ємнісного елементів.

При розробці проектної і конструкторської документації на електрообладнання застосовують електричні схеми, які, на відміну від схем заміщення, виконують у строгій відповідності до чинних на даний момент

часу стандартів, наприклад, стандартів ЄСКД – Єдиної системи конструкторської документації. Розрізняють схеми електричні принципові, структурні, функціональні, монтажні.

Частину кола, що має два полюси, називають двополюсником. Розрізняють двополюсники активні (що містять джерела) і пасивні (що не містять джерела).

З'єднання елементів кола, при якому по всіх ділянках проходить той самий струм, називають послідовним з'єднанням. Будь-який замкнутий шлях, що проходить по декількох послідовно з'єднаних ділянках, називають контуром електричного кола.

Ділянку кола, уздовж якої в будь-який момент часу струм має одне і теж значення, називають віткою, а місце з'єднання трьох або більшого числа віток – вузлом.

Для однозначності опису процесів, що відбуваються в якому-небудь елементі кола, необхідно знати не тільки величини його струму та напруги, але також їхні напрями в певний момент часу. Один з двох можливих напрямів струму в елементі беруть за основний і вказують його на схемі стрілкою. Стрілки, поставлені на схемах, вказують позитивні напрямки ЕРС, напруг і струмів. Якщо значення цих величин від'ємні, то їхні дійсні напрями протилежні вказаним на схемі стрілками.

**Електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок.**

**Дії електричного струму:**

**Теплова** (нагрівання провідника)

Прасуєте, припаюєте деталь електричним паяльником, готуєте на електричній плиті, обігріваєте кімнату електричним нагрівником, промисловість (зварювання, різання, плавлення металів), сільське господарство (обігрів теплиць та інкубаторів, сушіння зерна, сінажу); природа (енергія, що виділяється під час блискавки, може спричинити лісову пожежу)

**Світлова**(електрична енергія частково перетворюється на енергію світла)  
(електролампочки)

**Хімічна** (хімічне розкладання речовини)

## **Магнітна** (набуття магнітних властивостей)

Електричний струм чинить теплову, хімічну, магнітну дії на живі організми, в тому числі на людину.

**Електролікування:** теплову дію електричного струму використовують для прогрівання частин тіла, хімічну й магнітну — для стимулювання діяльності органів, поліпшення обміну речовин.

**Негативний вплив:** струм може викликати опік, судоми й навіть спричинити смерть.

## **Лекція 2.**

**Тема:** Основні елементи електричних кіл, послідовне, паралельне і змішане з'єднання, елементів, Закони Ома і Кірхгофа.

**Мета:** Вивчити елементи електричних кіл та їхні схеми з'єднання.

**Запитання лекції:**

1. Характеристики електричного кола.

2. Закони Кирхгофа.

**Електричне коло** (від нім. *elektrischer Kreis*) — сукупність сполучених між собою провідниками електронних компонентів, джерел струму й напруги, перемикачів тощо, крізь яку може проходити електричний струм.

Більш розлого — це з'єднання електричних складників (наприклад, батарей, резисторів, індукторів, конденсаторів, транзисторів) або модель такого з'єднання, що складається з електричних елементів (скажімо, джерел напруги, джерел струму, опорів, індуктивностей, ємностей). Електричне коло - це замкнена електрична мережа, що забезпечує зворотний шлях для струму. Отож, усі кола є мережами, але не всі мережі є електричними колами (хоча розімкнені мережі, часто неточно називають «колами»).

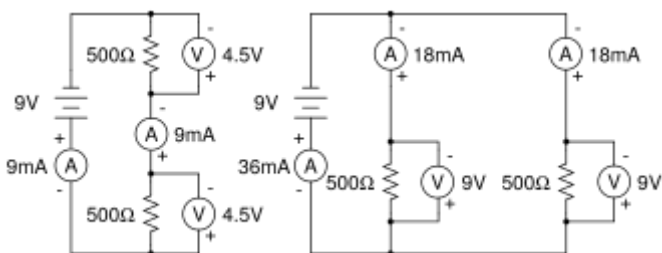
Електричне коло може містити як лінійні, так і нелінійні **елементи**.

Лінійними елементами електричного кола називають такі, для яких існує пропорційність між спадом напруги та силою струму. До лінійних елементів належать резистори, конденсатори та котушки індуктивності. Для нелінійних

елементів залежність між силою струму та спадом напруги, яку називають вольт-амперною характеристикою, — складна функція. До нелінійних елементів належать, наприклад, діоди й транзистори.

Для розрахунку електричних кіл з лінійними елементами використовуються правила Кірхгофа та закон Ома. Електричний струм може протікати тільки по замкненому електричному колу. Розрив кола в будь-якому місці викликає припинення електричного струму.

Під електричними колами постійного струму в електротехніці мають на увазі кола, в яких струм не змінює свого напрямку, тобто полярність джерел ЕРС в яких постійна. Під електричними колами змінного струму розуміються кола, в яких протікає струм, що змінюється в часі.



**У електротехніці** — так іноді називають правила Кірхгофа — два основних закони електричних кіл.

**Перший закон Кірхгофа** встановлює зв'язок між сумою струмів, спрямованих до вузла електричного з'єднання (додатні струми), і сумою струмів, спрямованих від вузла (від'ємні струми). Згідно з цим законом алгебраїчна сума струмів, що збігаються в будь-якій точці розгалуження провідників, дорівнює нулю.

**Другий закон Кірхгофа** встановлює зв'язок між сумою електрорушійних сил і сумою падінь напруги на резисторах замкненого контуру електричного кола. Згідно з цим законом алгебраїчна сума миттєвих значень електрорушійної сили всіх джерел напруги у будь-якому контурі електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі миттєвих значень падінь напруги на всіх резисторах того самого контуру

### Лекція 3.

**Тема:** Електричні кола змінного струму. Поняття про синусоїдальний струм. Виробництво синусоїдальної ЕРС. Миттєві, діючі і середні значення синусоїдальних ЕРС, струмів і напруг. Векторні зображення синусоїдального струму.

**Мета:** Вивчити основні поняття змінного струму.

**Запитання лекції:**

1. Одержання синусоїдної ЕРС.
2. Синусоїдний струм, миттєве та амплітудне значення.
3. Векторне зображення змінного струму.

#### Синусоїдний струм, миттєве та амплітудне значення

Гармонічний струм - це змінний струм, який з часом змінюється за законом синусу чи косинусу. Їх ще називають синусоїдний чи косинусоїдний струм.

Синусоїдний струм - елементарний, тобто його не можна розкласти на інші, більш прості змінні струми. Навпаки, складні періодичні струми намагаються розкласти на ряд синусоїдних струмів.

На практиці дуже поширені електричні кола синусоїдного струму, так як лише при цьому струмі наведенні у колі ЕРС самоіндукції та взаємоіндукції

пропорційні диференціалу струму за часом ( $e_L = -L \frac{di}{dt}$ ,  $e_M = -M \frac{di}{dt}$ ) і

напруга на затискачах конденсаторів, резисторів, двигунів... буде теж гармонічною, так як диференціал від синусоїди є косинусоїда, яка не відрізняється за формою від синусоїди. Кола змінного струму ми будемо розглядати на прикладі цього струму. Якщо в мережі струм змінюється по якомусь закону, то напруги, ЕРС, заряд теж змінюється за тим же законом.

Змінні величини характеризують наступними значеннями:

Миттєвим - значення струму, напруги та ЕРС у довільний будь-який момент часу. Позначаються малими латинськими літерами:

$$i = i(t), \quad u = u(t), \quad e = e(t)$$

Амплітудним, або максимальним - найбільше миттєве значення за період:

$$I_m, \quad U_m, \quad E_m$$

### Одержання синусоїдної ЕРС

Змінний струм промислової частоти на електростанціях створюють синхронні генератори трифазного струму. В них використовується явище електромагнітної індукції. Синусоїдний струм проходить лише в замкненому колі, в якому діє синусоїдна ЕРС. За допомогою генератора механічна енергія перетворюється в електричну енергію змінного струму. Генератор складається з нерухомої частини - статора та рухомої частини - ротора. Статор набирається з тонких листів електротехнічної сталі для зменшення втрат від вихрових струмів. Він має форму полого циліндра. У пази, які зроблені уздовж внутрішньої поверхні статора, вкладені ізольовані провідники - обмотка статора, в якій індукуються змінні ЕРС. Ротор уявляє собою електромагніт. В обмотку ротора струм збудження подається через мідні кільця (колектор). Магнітний потік ротора проходить через тіло ротора, два повітряних проміжки (між статором і ротором) та осердя статора. При обертанні ротора вже змінний магнітний потік перетинає обмотку статора та індукує в ній змінну ЕРС:

$$e = Blv \sin \alpha,$$

де  $B$  - магнітна індукція в пази, в якому знаходиться даний провідник, Тл.

$l$  - активна довжина цього провідника, м

$v$  - швидкість руху магнітного потоку по відношенню до провідника, м/с

$\alpha$  - кут між магнітними лініями та провідниками обмотки статора, який змінюється з поворотом контуру.

Магнітна індукція розподілена уздовж поверхні ротора синусоїдально завдяки формі полюсів: від середини полюсів до його країв повітряний проміжок поступово збільшується, а індукція зменшується. При цьому вектори індукції у будь-якій точці перпендикулярні поверхні ротора. В деяких точках на поверхні ротора індукція дорівнює нулю, так звана нейтральна площа,

Швидкість обертання ротора підтримується постійною, тому змінна ЕРС при обертанні ротора викликається лише зміною магнітної індукції уздовж поверхні ротора. Так як ця індукція розподілена уздовж поверхні ротора синусоїдально, то і ЕРС змінюється з часом теж синусоїдально. У зв'язку з цим генератори змінного струму розраховують так, щоб розподілення індукції уздовж поверхні ротора було синусоїдально. Тобто, щоб ротор обертася з постійною кутовою швидкістю в однорідному магнітному полі.

### Векторне зображення змінного струму

У загальному випадку частота струму та напруга мережі відомі, тому для побудови графіка струму чи напруги потрібно знати дві величини: початкову фазу та амплітуду. При відомій частоті синусоїдні величини можна представити у вигляді вектора.

Засіб зображення змінних величин у вигляді прямих ліній певної довжини й напрямку (тобто векторів) у початковий момент часу та співвідношення між ними на площині, називається векторною діаграмою. При зображенні синусоїдних величин довжина (модуль) вектора у обраному масштабі уявляє амплітуду змінної величини, кут між вектором й позитивним напрямком вісі абсцис у початковий момент часу дорівнює початковій фазі, а кутова частота направлена проти годинникової стрілки. Тобто вектор за час  $t$  обернеться на кут  $(\omega t)$ . Миттєве значення визначається проекцією вектора на вісь ординат.

Розглянемо векторну та хвильову діаграми струму, який змінюється за законом (рис.3.2):  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \Psi)$

У початковий момент часу вектор утворює з віссю абсцис кут  $\Psi$ , а проекція цього вектора на вісь ординат буде миттєвим значенням струму:

$$i(0) = I_m \sin \Psi$$

Через час  $t$  вектор струму повернеться на кут  $(\omega t)$  і миттєве значення струму буде  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \Psi)$ . При подальшому обертанні вектора його проекції зменшуються, пройдуть через негативні значення. При повному повороті вектора його проекція знову прийме первісне значення, а потім величини проекції будуть повторюватися.

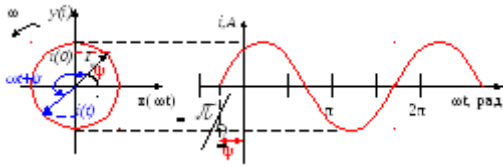


Рисунок 3.1 - Векторне зображення змінного струму

Між синусоїдою струму та обертовим вектором встановлено однозначна відповідність при виконанні умов:

1. Довжина вектора у певному масштабі дорівнює амплітуді.
2. Початок вектора збігається з початком координат.
3. Вектор утворює з позитивним напрямком вісі абсцис кут, який дорівнює початковій фазі струму.
4. Вектор обертається проти годинникової стрілки з кутовою частотою:  $\omega = 2\pi f$ . Тобто позитивну початкову фазу відкладають проти годинникової стрілки, а негативну - за годинниковою стрілкою. Обертання вектора розуміють, але не відображають на діаграмах.

#### 4 Додавання та віднімання синусоїдних величин

На одній векторній діаграмі векторами зображують величини лише однієї певної частоти, таким чином, обертання векторів відбувається з однією кутовою частотою, тобто їх взаємне розміщення залишається незмінним. При зрівнянні синусоїдних величин початок відрахування можна обрати довільно, тобто один із векторів можна направити довільно, а інші вектори потрібно розміщати по відношенню до першого під кутами, які дорівнюють відповідним кутам зсуву фаз. При цьому позитивні кути відкладають проти годинникової стрілки від першого вектора, а негативні - за годинниковою стрілкою. Розміщення векторів відносно один одного не залежить від того, який момент часу прийнятий за початковий.

При розрахунках кіл змінного струму потрібно виконувати складання чи вирахування синусоїдних величин, які мають однакову частоту, але різні амплітуди та початкові фази.

За допомогою векторних діаграм можна виконувати арифметичні операції зі змінними величинами для розрахунку електричних кіл.

Наприклад, для електричного вузла визначити струм  $i_1$ , якщо відомі струми:

$$i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \Psi_2), \quad i_3 = I_{m3} \sin(\omega t + \Psi_3)$$

Частота мережі  $50\text{Гц}$  (тобто кутова частота для усіх струмів однакова).

1. Визначимо миттєве значення струму за  $I$  законом Кірхгофа:

$$i_1 = i_2 + i_3 = I_{m2} \sin(\omega t + \Psi_2) + I_{m3} \sin(\omega t + \Psi_3)$$

Операцію складання виконаємо за допомогою діаграм.

2. Визначимо струм  $i_1$  за допомогою хвильової діаграми. Для цього побудуємо синусоїди відомих струмів і для отримання сумарної кривої потрібно для кожного моменту часу скласти ординати відомих синусоїд.

3. Визначимо струм  $i_1$  за допомогою векторної діаграми (рис.2). Для цього відкладаємо відомі струми у масштабі й за правилом складання векторів (правило паралелограма) знаходимо вектор струму:

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \Psi_1)$$

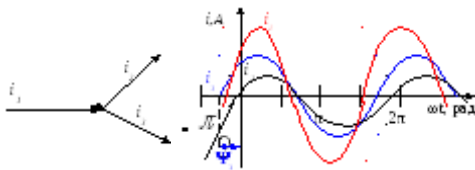


Рисунок 2 - Складання струмів за допомогою хвильових діаграм

Якщо за відомими струмами  $i_1$  та  $i_3$  треба визначити  $i_2$ , то для віднімання векторів можна використати правило трикутника. Віднімання двох векторів замінюють складання цих двох величин, лише ту величину, яку вираховують беруть негативною:

$$i_2 = i_1 - i_3 = i_1 + (-i_3)$$

Потрібно пам'ятати, що зміна знака у синусоїди відповідає зміні початкового фазного кута на  $180^\circ$ :

$$-I_{m3} \sin(\omega t + \Psi_3) = I_{m3} \sin(\omega t + \Psi_3 \pm \pi)$$

У векторів це означає поворот вектора на  $\pm 180^\circ$ .

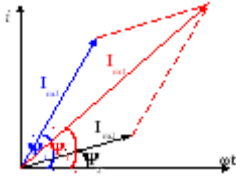


Рисунок 3 - Складання струмів за допомогою векторних діаграм

Таким чином, при складанні чи відніманні гармонічних величин однієї частоти отримуємо гармонічну величину той же частоти, амплітуда якої дорівнює геометричній сумі чи різниці амплітуд відомих величин:

$$I_{m1}^2 = I_{m2}^2 + I_{m3}^2 + 2I_{m2} \times I_{m3} \times \cos \phi,$$

$$\operatorname{tg} \Psi_1 = \frac{I_{m2} \sin \Psi_2 + I_{m3} \sin \Psi_3}{I_{m2} \cos \Psi_2 + I_{m3} \cos \Psi_3}$$

де  $\phi = \Psi_3 - \Psi_2$  - зсув фаз між  $i_2$  та  $i_3$

Перевагою зображення синусоїдних величин векторами є у тому, що при такому зображенні сума та різниця кількох величин може бути визначена графічно швидко і просто, у той час як при зображенні величин синусоїдами ці операції складні і потребують багато часу.

У випадку складання двох гармонічних величин зі зсувом фаз  $90^\circ$

$$i_2 = I_{m2} \sin(\omega t), \quad i_3 = I_{m3} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$\text{отримаємо: } I_{m1} = \sqrt{I_{m2}^2 + I_{m3}^2}$$

$$\operatorname{tg} \Psi_1 = \frac{I_{m3}}{I_{m2}}$$

У випадку складання двох гармонічних величин з однаковими початковими фазами  $i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + 60^\circ)$ ,  $i_3 = I_{m3} \sin(\omega t + 60^\circ)$  отримаємо:

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{m2} \sin(\omega t + 60^\circ) + I_{m3} \sin(\omega t + 60^\circ) = (I_{m2} + I_{m3}) \sin(\omega t + 60^\circ) = \\ &= I_{m1} \sin(\omega t + 60^\circ) \end{aligned}$$

При складанні двох синусоїдних величин різної частоти отримуємо несинусоїдну величину, яка не може зображатися вектором, який обертається.

При більшій кількості векторів їх складання виконується методом багатокутника, тобто вектори переносяться паралельно самим себе так, щоб початок другого вектора збігався з кінцем першого і так далі. Замикаючий вектор зображує сумарну величину.

Приведені положення про геометричне складання векторів синусоїдних струмів однакової частоти відносяться і до інших синусоїдних величин.

## Лекция 4

**Тема: Резистори, конденсатори, котушки індуктивності в коле змінного струму. Трикутники опорів і провідності.**

**Мета:** вивчити властивості основних елементів у колі змінного струму

Запитання лекції:

1. Кола змінного струму з індуктивністю .
2. Коло змінного струму з ємністю.
3. Активна та реактивна потужність.

### 1. Коло змінного струму з індуктивністю

Розглянемо коло, у якому до котушки індуктивності  $L$ , що не має активного опору ( $R = 0$ ), прикладена синусоїдальна напруга й по якій тече синусоїдальний струм

$$I(t) = I_m \sin \omega t . \quad (1)$$

Змінний струм, що протікає через котушку, створює в ній ЕРС самоіндукції  $e_L$ . Тоді у відповідності із другим правилом Кірхгофа можна

$$u + e_L = 0. \quad (2)$$

Згідно із законом Фарадея ЕДС самоіндукції

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

З (1), (2) і (3) одержимо:

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = I_m \omega L \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

де

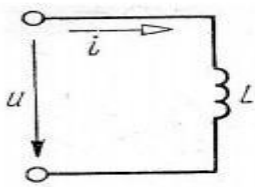
$$U_m = I_m \omega L. \quad (5)$$

Ділячи обидві частини рівності (5) на  $I_m$ , одержимо для діючих значень  $U$  і  $I$   $U = I \omega L$ , звідки

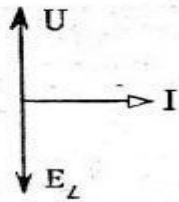
$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{X_L} \quad (6)$$

З формули (6) ми бачимо, що в розглянутому ланцюзі струм відстає по фазі від напруги на кут  $\frac{\pi}{2}$

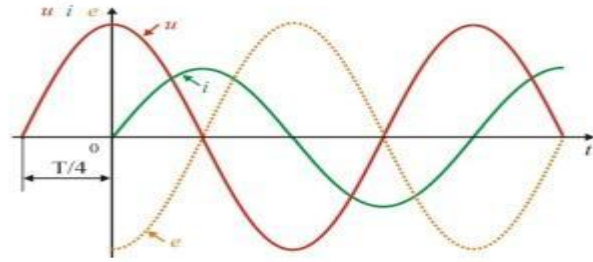
. Фізично це пояснюється тим, що індуктивна котушка реалізує інерцію електромагнітних процесів. Векторна діаграма для цього ланцюга зображена на мал. 2, а часові – на мал. 3.



Мал. 1. Ланцюг змінного струму з індуктивністю



Мал. 2. Векторна діаграма ланцюга змінного струму з індуктивністю



Мал. 3. Часові діаграми напруги, струму й ЕРС для ланцюга з індуктивністю

Співвідношення (6) являє собою закон Ома для ланцюга з ідеальною індуктивністю, а величина  $X_L = \omega L = 2\pi fL$  називається індуктивним опором.

Індуктивний опір вимірюється в омах. Зі збільшенням частоти струму  $f$  індуктивний опір  $X_L$  збільшується (мал. 4). Фізично це пояснюється тим, що зростає швидкість зміни струму, а отже, і ЕРС самоіндукції.

Миттєва потужність у ланцюзі із чисто індуктивним опором рівна:

$$p = iu = I_m U_m \sin \omega t \cos \omega t = UI \sin 2\omega t \quad (7)$$

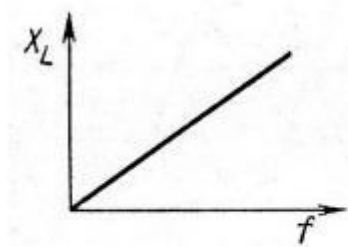
Ми бачимо (мал. 5), що вона змінюється за законом синуса з подвоєною частотою.

Позитивні значення потужності відповідають накопиченню енергії котушкою, а негативні – поверненню запасеної енергії назад джерелу.

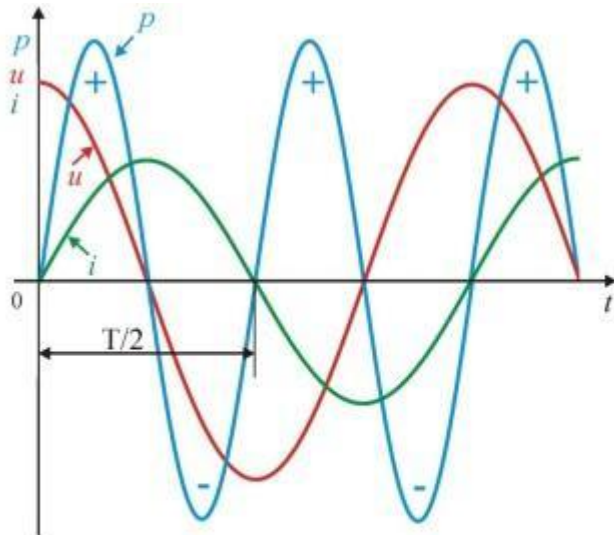
Середня

за період потужність дорівнює нулю. Отже, ланцюг з індуктивністю потужності

не споживає, у ній відбувається лише перекачування електричної енергії від джерела в котушку й назад. Опір такого ланцюга називають реактивним.



Мал. 4. Залежність індуктивного опору від частоти



Мал. 5. Часові діаграми напруги, струму й миттєвої потужності для кола з індуктивністю

Реальні ланцюги, що містять індуктивність, завжди мають і активний опір: опір проведення обмотки проводів. Тому розглянемо електричне коло (мал. 6), у якому через котушку індуктивності  $L$ , що володіє активним опором  $R$  протікає змінний струм.

Через котушку й резистор протікає той самий струм, тому в якості основного виберемо вектор струму й будемо будувати вектор напруги, прикладеного до цього ланцюга.

Напруга, прикладена до ланцюга, дорівнює векторній сумі падінь напруг на котушці індуктивності й резисторі:

$$U = U_R + U_L \quad (8)$$

Напруга на резисторі, як було показано вище, буде збігатися по фазі зі струмом, а напруга на індуктивності буде випереджати струм на кут  $\pi/2$

Побудувавши вектори  $I$  і скориставшись формулою (8) знайдемо вектор  $U$ . Векторна діаграма показана на мал. 7. Ми бачимо, що в розглянутому колі струм відстає по фазі від прикладеного напруги  $U$ , але не на  $\pi/2$ , як у випадку чистої індуктивності, а на деякий кут  $\phi$ . Цей кут може приймати значення від 0 до  $\pi/2$  й при заданій індуктивності залежить від значення активного опору: зі збільшенням  $R$  кут  $\phi$  зменшується.

По теоремі Піфагора

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \quad (9)$$

Т.к.  $U_R = IR$ , а  $U_L = IX_L$ , то  $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_L^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2}$ ,  
звідки

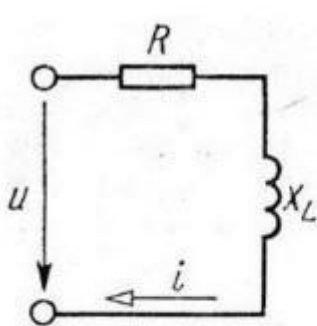
$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (10)$$

Уведемо позначення  $\sqrt{R^2 + X_L^2} = Z$ , де  $Z$  - **повний опір** ланцюги.

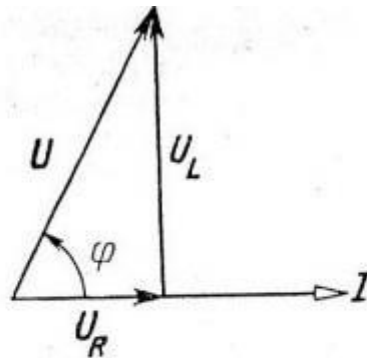
Тоді вираз закону Ома прийме вигляд

$$I = \frac{U}{Z} \quad (11)$$

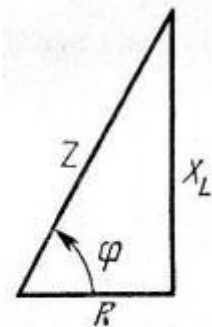
Тому що повний опір ланцюга  $Z$  визначається по теоремі Піфагора, йому відповідає трикутник опорів (мал. 8).



Мал. 6. Схема ланцюга змінного струму з  $R$  і  $L$



Мал. 7. Векторна діаграма для ланцюга з  $R$  і  $L$



Мал. 8. Трикутник опорів для ланцюга з  $R$  і  $L$

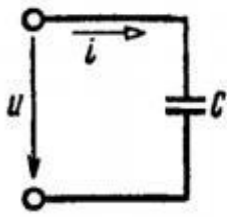
Із трикутника опорів визначається зрушення фаз між струмом і напругою:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R} \quad (12)$$

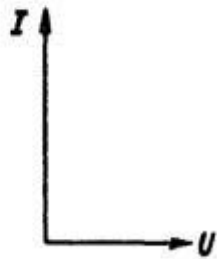
$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \quad (13)$$

## 2. Коло змінного струму з ємністю

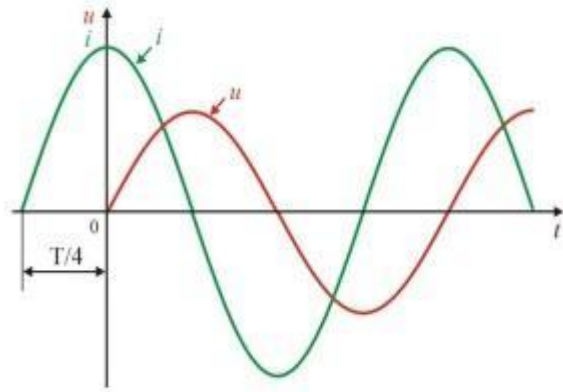
Розглянемо електричне коло, у якому змінна напруга  $U(t) = U_m \sin \omega t$  прикладена до ємності  $C$  (мал. 9).



Мал. 9. Схема ланцюга змінного струму з ємністю



Мал. 10. Векторна діаграма напруги й струму з ємністю



Мал. 11. Часові діаграми напруги й струму для ланцюга з ємністю

Миттєве значення струму в ланцюзі з ємністю дорівнює швидкості зміни заряду на обкладинках конденсатора:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (14)$$

але оскільки  $q = Cu$ , то

$$i = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

де

$$U_m \omega C = I_m. \quad (15)$$

Ми бачимо, що в цьому ланцюзі струм випереджає напругу на кут  $\frac{\pi}{2}$ . Поділ зарядів на обкладинках і, як наслідок, появу напруги на ємності можна зрівняти із процесом збільшення рівня рідини при заповненні баку.

Для діючих значень  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ ,  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$  вираз (15) запишеться як

$$U \omega C = I, \quad (16)$$

звідки одержимо вираз для струму:

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{X_c} \quad (17)$$

Це закон Ома для ланцюга змінного струму з ємністю, а величина

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (18)$$

називається **ємнісним опором**. Векторна діаграма для цього ланцюга показана на мал. 10, а часові - на мал. 11.

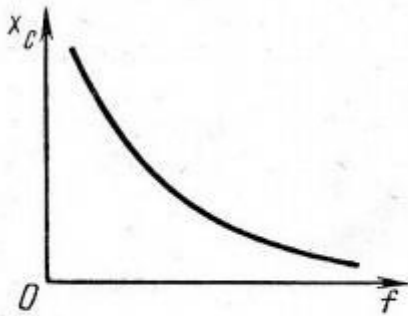
З формули (18) і мал. 12 випливає, що ємнісний опір  $X_c$  зменшується з ростом частоти  $f$ . Це пояснюється тим, що при більшій частоті заряд і розряд конденсатора відбуваються швидше, тобто в одиницю часу через конденсатор проходить більша кількість електрики, що рівносильне зменшенню опору.

Миттєва потужність у ланцюгу, що містить ємність:

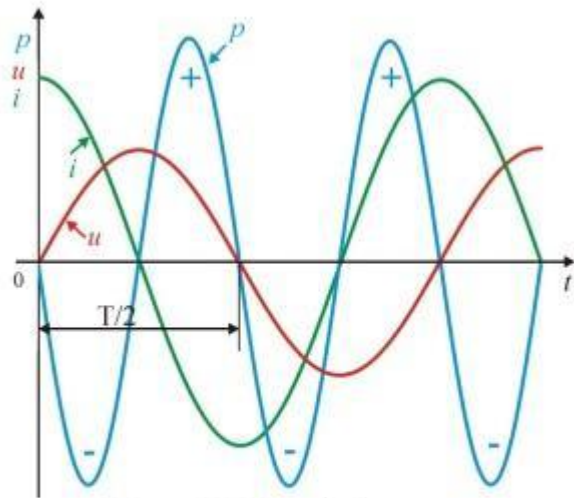
$$p = iu = I_m \sin \omega t \cdot U_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = -U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = -UI \sin 2\omega t \quad (19)$$

Ми бачимо (мал. 13), що миттєва потужність змінюється з подвоєною частотою. При цьому позитивні значення потужності відповідають заряду конденсатора, а негативні - його розряду й поверненню запасеної енергії в джерело. Середня за період потужність тут дорівнює нулю, оскільки в ланцюзі з

конденсатором активна потужність не споживається, а відбувається обмін електричною енергією між конденсатором і джерелом. Отже, конденсатор, так само як і індуктивність, є реактивним опором.



Мал. 12. Залежність ємнісного опору від частоти



Мал. 13. Часові діаграми напруги, струму й миттєвої потужності для ланцюга з ємністю

## Лекція 5

**Тема:** Однофазні електричні кола. Закони Ома і Кірхгофа в колах змінного струму.

**Мета:** вивчити особливості законів Ома та Кірхгофа в колах змінного струму

**Запитання лекції:**

1. Закон Ома.
2. Перший закон Кірхгофа.
3. Другий закон Кірхгофа.

Закон Ома і закони Кірхгофа для миттєвих значень напруг і струмів формуються однаково і незалежно від того, чи є кола лінійні чи нелінійні, змінюються чи не змінюються в них напруги та струми в часі.

Так, відповідно до першого закону Кірхгофа, алгебраїчна сума миттєвих значень струмів в вузлі електричного кола дорівнює нулю:

$$\sum i_k = 0$$

У комплексній формі рівняння першого закону Кірхгофа для електричних кіл синусоїдального струму має вигляд:

$$\sum \dot{I}_k = 0$$

Рівняння другого закону Кірхгофа формулюється так: алгебраїчна сума миттєвих значень напруг, які діють на всіх ділянках у будь-якому контурі електричного кола, дорівнює нулю, тобто:

$$\sum u_k = 0$$

а його комплексна форма в колах синусоїдального струму має вигляд:

$$\sum \dot{U}_k = 0$$

З урахуванням закону Ома, другий закон Кірхгофа може бути сформульований так: алгебраїчна (комплексна) сума спаду напруг на активних і реактивних елементах будь-якого контуру дорівнює алгебраїчній (комплексній) сумі ЕРС, які діють в цьому контурі. Правила запису рівнянь залишаються такими, як і для електричних кіл постійного струму.

## Лекція 6.

**Тема:** Резонансні явища в колах змінного струму.

**Мета:** вивчити режим роботи електричного кола – резонанс.

**Запитання лекції:**

1. Поняття резонансного явища в електричних колах змінного струму.
2. Резонанс у послідовному коливальному контурі
3. Резонанс у паралельному коливальному контурі.

## 1. Поняття резонансного явища в електричних колах змінного струму.

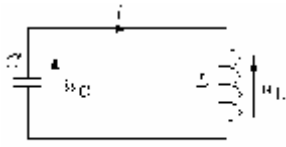


Рис. 2.24.

Під резонансом в електротехніці розуміється сукупність процесів, що відбуваються в електричних колах, коли частота вільних коливань співпадає із частотою збуджуючого впливу. Під збуджуючим впливом розуміється змінна, прикладена до кола, напруга. Що таке вільні коливання в колі пояснимо на прикладі схеми, наведену на рис. 2.24.

Коло складається із зарядженого до напруги  $u_C$  конденсатора  $C$  і котушки індуктивності  $L$ . При підключенні конденсатора до індуктивності він буде розряджатись і в колі виникне струм  $i$ . Додатні напрямки напруг на елементах, зумовлені струмом, показані на рисунку. Стан схеми описується рівнянням:  $u_C - u_L = 0$ . Або, виражаючи напруги через струми:

$$-\frac{1}{C} \int i dt - L \frac{di}{dt} = 0 \quad . \text{ Диференціюючи рівняння будемо мати остаточно:}$$

$$LC \frac{d^2 i}{dt^2} + i = 0$$

Знак «-» у законі Ома для ємності  $\left( u_C = -\frac{1}{C} \int i dt \right)$  тут зумовлений тим, що в цій схемі ємність виступає як джерело і в ній напрямок стрілки струму співпадає із напрямком стрілки струму (див. п.1.1.1).

Характеристичне рівняння отриманого диференціального рівняння матиме

вид:  $LCp^2 + 1 = 0$ . Його рішення:  $i = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$ . В останньому виразі  $p_1$  і  $p_2$  – корні характеристичного рівняння, з якого

$$p_{1,2} = \pm \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{-1} = \pm j\omega_0$$

Кругова частота  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  або циклічна частота  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  називається частотою власних коливань в колі або контурі.

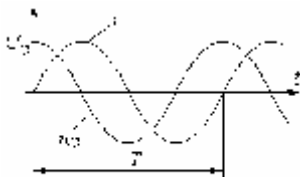


Рис. 2.25.

Струм в колі буде  $i = \frac{U_C}{\omega_0 L} \sin \omega_0 t$  і змінюватиметься за синусоїдальним законом.

Напруга на ємності дорівнює  $u_c = -\frac{1}{C} \int i dt = U_c \cos \omega_0 t$ . Криві коливального процесу, що відповідають  $u_c$  і  $i$ , показані у відповідних масштабах на рис. 2.25.

В електричному колі, що включає котушку індуктивності і конденсатор виникають коливання. Коливальний процес в колі – це періодичний обмін енергією між електричним полем конденсатора і магнітним полем котушки. Таке коло має назву коливальним контуром. Розглянемо такий контур, в якому відсутній активний опір ( $r = 0$ ), – ідеальний коливальний контур.

Конденсатор ємністю  $C$ , попередньо заряджений від зовнішнього джерела до

напруги  $U_c$ . Енергія електричного поля конденсатора складає  $W_c = \frac{CU_c^2}{2}$ . До зарядженого конденсатора приєднується ідеальна котушка з індуктивністю  $L$ . Оскільки конденсатор почне розряджатись в колі виникне струм  $i$ . Енергія електричного поля конденсатора перетворюється на енергію магнітного поля

катушки  $W_L = \frac{I^2 L}{2}$ . В той момент, коли конденсатор повністю розрядиться і його напруга впаде до нуля, струм в колі досягне максимального значення  $I_m$ . ЕРС самоіндукції  $e_L$  катушки в цей час діє зустрічно струму, гальмуючи його збільшення (рис. 2.25). В другій чверті періоду напруга  $U_c$  збільшується і конденсатор заряджається за рахунок накопиченої енергії катушки при тому ж напрямку струму, який зменшується до нуля і який в цей час підтримується ЕРС самоіндукції  $e_L$ , що змінила свій напрямок. Процес повторюється, але при зворотному напрямку струму. Отже в ідеальному колі буде безперервно відтворюватись перезаряд конденсатора через котушку індуктивності – утворяться вільні коливання.

Коливальний процес в колі – це періодичний обмін енергією між електричним полем конденсатора і магнітним полем катушки індуктивності.

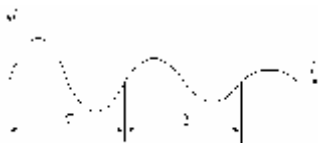


Рис. 2.25.

Частота вільних коливань однозначно визначається через параметри коливального контуру  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  і називається частотою власних коливань коливального контуру.

В реальному коливальному контурі, де є активний опір ( $r \neq 0$ ), є втрати енергії через нагрів – колювання контуру будуть затухаючими (рис. 2.26).

Щоб підтримувати *незатухаючі* колювання енергії між електричним і магнітним полями, тобто отримати в контурі синусоїдальний струм з незмінною амплітудою, потрібно підводити до контуру енергію, що компенсує теплові втрати. Передача контуру цієї енергії повинно проводитись періодично – в такт з власними колюваннями контуру. Це означає, що на протязі кожного періоду до контуру необхідно підвести кількість енергії, що втрачається ним у вигляді тепла.

Це можна здійснити, якщо в коло коливального контуру включити джерело змінного струму з частотою  $f$ , рівною частоті  $f_0$  коливального контуру.

По аналогії з механічною системою, де є збіг частоти вимушених колювань з частотою власних має назву резонанс, процес, що протікає в електричному коливальному контурі також має назву резонанс.

В електротехніці розглядаються резонанс в послідовному колі або резонанс напруг і резонанс в паралельному колі або резонанс струмів.

Однією із характеристик коливального контуру є його добротність (позначається літерою  $Q$ ). Добротність – характеристика коливальної системи, що визначає смугу резонансу і показує, у скільки разів запаси енергії в коливальній системі більше, ніж втрати енергії в системі за один період колювання, або у скільки разів амплітуда вимушених колювань при резонансі перевищує їх амплітуду за його відсутності. Нагадаємо, що в коливальному контурі енергія накопичується реактивними елементами, а втрачається в активних елементах.

Добротність обернено пропорційна швидкості затухання власних колювань в системі. Тобто, чим вище добротність коливальної системи, тим менше втрати енергії за кожний період і тим повільніше загасають колювання.

Величину обернену добротності називають затуханням контуру і позначають літерою  $\alpha = 1/Q$ ,

Загальна формула для добротності будь-якої коливальної системи:

$Q = \frac{\omega_0 W_{\max}}{P_d}$ , де:  $\omega_0$  – кругова резонансна частота коливань,  $W_{\max}$  – максимальна енергія, що накопичена в контурі на резонансній частоті,  $P_d$  – потужність активних втрат при тих же умовах.

Як буде показано далі, для послідовного коливального контуру в  $rLC$ -колі, в

якому всі три елементи включені послідовно:  $Q = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Для паралельного

контуру, в якому індуктивність, ємність і опір ключені паралельно:  $Q = r \sqrt{\frac{C}{L}}$ .

## Лекція 7.

**Тема: Активна, реактивна і повна потужності в кола змінного струму. Коефіцієнт потужності.**

**Мета:** вивчити потужності діючих у колах змінного струму.

**Запитання лекції:**

1. Потужність змінного струму
2. Коефіцієнт потужності.

У повсякденному житті практично кожен стикається з поняттям “електрична потужність”, “споживана потужність” або “скільки ця штука “їсть” електрики”. У цій добірці ми розкриємо поняття електричної потужності змінного струму для технічно підкованих фахівців і покажемо на зображенні електричну потужність у вигляді “скільки ця штука їсть електрики” для людей з гуманітарним складом розуму :-). Ми розкриваємо найбільш практичне і застосовне поняття електричної потужності і навмисно уникаємо опису диференціальних виразів електричної потужності.

### 1. Потужність змінного струму

У колах змінного струму формула для потужності постійного струму може бути застосована лише для розрахунку миттєвої потужності, яка сильно змінюється в часі та для практичних розрахунків марна. Прямий розрахунок середнього значення потужності вимагає інтегрування за часом. Для обчислення потужності в колах, де напруга і струм змінюються періодично,

середню потужність можна обчислити, інтегруючи миттєву потужність протягом періоду. На практиці найбільше значення має розрахунок потужності в колах змінної синусоїдальної напруги та струму.

Для того, щоб зв'язати поняття повної, активної, реактивної потужностей і коефіцієнта потужності, зручно звернутися до теорії комплексних чисел. Можна вважати, що потужність у ланцюзі змінного струму виражається комплексним числом таким, що активна потужність є його дійсною частиною, реактивна потужність – уявною частиною, повна потужність – модулем, а кут  $\varphi$  (зсув фаз) – аргументом. Для такої моделі виявляються справедливими всі виписані нижче співвідношення.

### Активна потужність (Real Power)

Одиниця виміру – ват (російське позначення: Вт, кіловат – кВт; міжнародне: ват -W, кіловат – kW).

Середнє за період  $T$  значення миттєвої потужності називається активною потужністю, і

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

виражається формулою:

У ланцюгах однофазного синусоїдального струму  $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ , де  $U$  і  $I$  це середньоквадратичні значення напруги і струму, а  $\varphi$  – кут зсуву фаз між ними.

Для кіл несинусоїдального струму електрична потужність дорівнює сумі відповідних середніх потужностей окремих гармонік. Активна потужність характеризує швидкість необоротного перетворення електричної енергії в інші види енергії (теплову та електромагнітну). Активна потужність може бути також виражена через силу струму, напругу й активну складову опору ланцюга  $r$  або його провідність  $g$  за формулою  $P = I^2 \cdot r = U^2 \cdot g$ .

### Коефіцієнт потужності.

У будь-якому електричному ланцюзі як синусоїдального, так і несинусоїдального струму активна потужність усього ланцюга дорівнює сумі активних потужностей окремих частин ланцюга, для трифазних ланцюгів

електрична потужність визначається як сума потужностей окремих фаз. З повною потужністю  $S$ , активна пов'язана співвідношенням  $P = S \cdot \cos \varphi$ .

У теорії довгих ліній (аналіз електромагнітних процесів у лінії передавання, довжину якої можна порівняти з довжиною електромагнітної хвилі) повним аналогом активної потужності є прохідна потужність, яку визначають як різницю між падаючою потужністю та відбитою потужністю.

### Реактивна потужність (Reactive Power)

Одиниця виміру – вольт-ампер реактивний (російське позначення: вар, кВАР; міжнародне: var).

Реактивна потужність – величина, що характеризує навантаження, створювані в електротехнічних пристроях коливаннями енергії електромагнітного поля в колі синусоїдального змінного струму, дорівнює добутку середньоквадратичних значень напруги  $U$  і струму  $I$ , помноженому на синус кута зсуву фаз  $\varphi$  між ними:

$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$  (якщо струм відстає від напруги, зсув фаз вважається позитивним, якщо випереджає – негативним). Реактивна потужність пов'язана з повною потужністю  $S$  та активною потужністю  $P$  співвідношенням:  $|Q| = \sqrt{S^2 - P^2}$ .

Фізичний сенс реактивної потужності – це енергія, що перекачується від джерела на реактивні елементи приймача (індуктивності, конденсатори, обмотки двигунів), а потім повертається цими елементами назад у джерело протягом одного періоду коливань, віднесена до цього періоду.

Необхідно зазначити, що величина  $\sin \varphi$  для значень  $\varphi$  від 0 до плюс  $90^\circ$  є позитивною величиною. Величина  $\sin \varphi$  для значень  $\varphi$  від 0 до мінус  $90^\circ$  є негативною величиною. Відповідно до формули  $Q = UI \sin \varphi$

реактивна потужність може бути як позитивною величиною (якщо навантаження має активно-індуктивний характер), так і негативною (якщо навантаження має активно-ємнісний характер). Ця обставина підкреслює той факт, що реактивна потужність не бере участі в роботі електричного струму. Коли пристрій має позитивну реактивну потужність, то заведено говорити, що він її споживає, а коли негативну – то виробляє, але це чиста умовність, пов'язана з тим, що більшість електроспоживаючих пристроїв (наприклад,

асинхронні двигуни), а також суто активне навантаження, яке під'єднують через трансформатор, є активно-індуктивними.

Синхронні генератори, встановлені на електричних станціях, можуть як виробляти, так і споживати реактивну потужність залежно від величини струму збудження, що протікає в обмотці ротора генератора. За рахунок цієї особливості синхронних електричних машин здійснюється регулювання заданого рівня напруги мережі. Для усунення перевантажень і підвищення коефіцієнта потужності електричних установок здійснюється компенсація реактивної потужності.

Застосування сучасних електричних вимірювальних перетворювачів на мікропроцесорній техніці дає змогу здійснювати більш точну оцінку величини енергії, що повертається від індуктивного і ємнісного навантаження в джерело змінної напруги.

### Повна потужність (Apparent Power)

Одиниця повної електричної потужності – вольт-ампер (російське позначення: В-А, ВА, кВА-кіло-вольт-ампер; міжнародне: V-A, kVA).

Повна потужність – величина, що дорівнює добутку діючих значень періодичного електричного струму  $I$  в ланцюзі та напруги  $U$  на його затискачах:  $S = U \cdot I$ ; співвідношення повної потужності з активною та

реактивною потужностями виражається в такому вигляді:  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ , де  $P$  – активна потужність,  $Q$  – реактивна потужність (за індуктивного навантаження  $Q > 0$ , а за ємнісного  $Q < 0$ ).

Векторна залежність між повною, активною та реактивною потужністю виражається формулою:  $\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q}$ .

Повна потужність має практичне значення як величина, що описує навантаження, які споживач фактично накладає на елементи електромережі, яка підводить (дроти, кабелі, розподільчі щити, трансформатори, лінії електропередачі), тому що ці навантаження залежать від струму, що споживається, а не від фактично використаної споживачем енергії. Саме тому повна потужність трансформаторів і розподільних щитів вимірюється у вольт-амперах, а не у ватах.

## Лекція 8.

**Тема:** Трифазі кола. Виробництво трифазної ЕРС. Поняття про лінійні та фазні параметри.

**Мета:** вивчити особливості роботи трифазних кіл змінного струму.

**Запитання лекції:**

1. Загальні відомості про трифазні ланцюги змінного струму.
2. Отримання трифазних ЕРС змінного струму.

### 1. Загальні відомості про трифазні ланцюги змінного струму

Трифазний струм — змінний струм у електричному колі, побудованому так, щоб у трьох лініях коливання сили струму відбувалися зі зсувом фази на  $\frac{2\pi}{3}$ . Трифазний струм широко використовується в системах промислового і побутового електропостачання. Свого розвитку трифазний (а не скажімо дво- або чотирифазний) струм, набув завдяки тому, що дає змогу легко створювати обертове магнітне поле, необхідне для електродвигунів змінного струму. Тридротова лінія електропередач («трифазка») дозволяє передавати втричі більшу потужність, ніж дводротова лінія завдяки більшій рівномірності. Зараз трифазний струм є основним стандартом приєднання побутових споживачів (будинків у містах, вулиць у селах) та непотужних промислових споживачів.

Існують схеми трифазних кіл із **нульовим проводом** і без нульового дроту. Нульовий провід дає змогу отримувати водночас вищу напругу, використовуючи переваги трифазної схеми електропостачання, зберігаючи можливість однофазного під'єднання з меншою напругою.

В схемі з нульовим проводом, споживач може під'єднувати навантаження між нульовим проводом і однією з фаз або між двома різними фазами. Різницю потенціалів між фазою і нульовим проводом називають фазною напругою, між двома фазами — лінійною.

### 2. Отримання трифазних ЕРС змінного струму

Джерело трифазного струму будується таким чином, що електрорушійна сила в трьох різних проводах трифазної схеми описується формулам

Різниця напруг в ідеальній мережі між двома фазами, наприклад: 1-ю і 2-ю дорівнює в  $\sqrt{3}$  разів більшу амплітуду.

У стандартній мережі електропостачання в Україні, фазна напруга становить 230 В, лінійна — 400 В.

- Наведені формули справедливі у випадку добре збалансованої трифазної мережі, коли навантаження у всіх трьох фазах однакові. У незбалансованих мережах, існують відхилення кутів зсуву від значення  $\pm 30^\circ$  і значень амплітуд у фазах. Трифазне коло можна використовувати як три окремі однофазні.
- Трифазні кола економніші однофазних, потребують на 75% менше провідника ніж однофазне коло для передачі такої ж потужності.<sup>[2][1]</sup>
- Вони дають менші пульсації струму після випрямлення та уможлиблюють за допомогою простих засобів отримати обертове магнітне поле у електродвигунах. Трифазні двигуни обертаються плавніше, з постійним обертовим моментом, що є корисною якістю потужних двигунів. Більшість побутових приладів розраховані на роботу з однією фазою. Водночас потужні трифазні електродвигуни конструктивно простіші за однофазні, оскільки не потребують системи зсуву фаз.

## Лекція 9.

**Тема: З'єднання обмоток трифазного генератора і фаз споживача "зіркою" та «трикутником»**

**Мета:** Вивчити основні схеми з'єднання у трифазних колах.

**Запитання лекції:**

1. Схема з'єднання в трифазних колах "зірка-зірка"
2. Схема з'єднання в трифазних колах "трикутник-трикутник"

Існують два способи сполучення окремих **фаз (обмоток) трифазного генератора** – з'єднання «зіркою» (Y) і «трикутником» (Δ).

### 1. Схема з'єднання в трифазних колах "зірка-зірка"

З'єднання фаз джерела й приймача зіркою при різних видах навантаження

#### 1). Випадок симетричного навантаження з нейтральним проводом:

а) лінійні струми дорівнюють фазним  $I_L = I_\phi$  (тобто,  $I_A = I_a; I_B = I_b; I_C = I_c$ );

б) діючі значення фазних напруг на споживачах однакові між собою і дорівнюють діючим значенням фазних напруг генератора ( $U_{\phi \text{ ген}} = U_{\phi \text{ сп}}$ );

в) оскільки при симетричному навантаженні фазні напруги однакові і утворюють симетричну систему напруг, то струми у всіх трьох фазах будуть теж однаковими ( $I_a = I_b = I_c$ ) й зсуненими на  $120^\circ$  між собою, тобто утворюють симетричну систему.

г) фазні струми знаходимо за законом Ома:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}, \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_B}{Z_B}, \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_C}{Z_C},$$

де  $Z_A = Z \cdot e^{j\varphi_a}$ ,  $Z_B = Z \cdot e^{j\varphi_b}$ ,  $Z_C = Z \cdot e^{j\varphi_c}$  - комплексні повні опори споживачів фази;  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  - кути зсуву фаз між фазними напругами і фазними струмами на навантаженні, які визначаються із трикутників опорів відповідних фаз ( $\cos \varphi_a = R_a / Z_a$ ,  $\cos \varphi_b = R_b / Z_b$ ,  $\cos \varphi_c = R_c / Z_c$ ).

г) при наявності нейтрального проводу  $nN$  перший закон Кірхгофа для вузла  $n$ :

$$\dot{I}_{nN} = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_a (1 + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}) = \dot{I}_a \cdot 0 = 0.$$

Із наведеної суми випливає, що при симетричному навантаженні внаслідок створення симетричної системи фазних (чи лінійних) струмів струм у нейтральному провіднику відсутній. Тому **при симетричному навантаженні нейтрального проводу не встановлюють**. Потенціали нейтралі генератора й нейтралі споживачів однакові ( $\varphi_n = \varphi_N$ ), і на векторних

діаграмах відповідні їм точки  $n$  і  $N$  розташовуються в одній точці (в центрі трикутника векторної діаграми лінійних напруг).

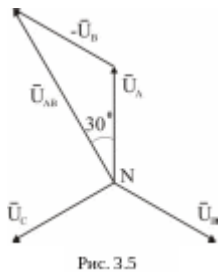
Таким чином, приймачі електричної енергії, що мають гарантоване симетричне навантаження, вмикають за **трипровідною схемою** (тобто без нульового проводу).

д) за другим законом Кірхгофа лінійні напруги визначають як геометричну різницю векторів (рис. 3.4):

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B ; (1)$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C ;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A .$$



Знаходимо зв'язок між лінійними і фазними напругами шляхом переходу від дії над комплексними величинами до дії над векторами (рис. 6.5), використовуючи, наприклад, перше рівняння.

У векторній діаграмі фазних напруг врахована рівність їх

модулів та зсув фаз між ними на  $120^\circ$  ( $\dot{U}_A = U \cdot e^{j0}$   $\dot{U}_B = U \cdot e^{-j120^\circ}$

,  $\dot{U}_C = U \cdot e^{j120^\circ}$ ). З рис.3.5 знаходимо, що діюче значення лінійної напруги  $U_{AB}$  визначається через діюче значення фазної напруги  $U_A$  за формулою:  $U_{AB} = \sqrt{3}U_A$  .

Отже, зв'язок між лінійною і фазною напругами при з'єднанні трифазного генератора і приймачів за схемою зірка:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}} .$$

## 2). Випадок несиметричного навантаження ( $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ )

### а) випадок без нейтрального проводу

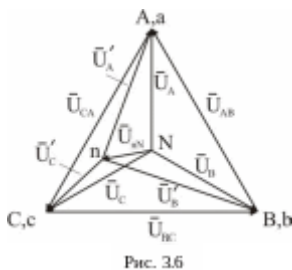
У випадку несиметричного навантаження фазні напруги на приймачі будуть різними ( $\dot{U}'_A \neq \dot{U}'_B \neq \dot{U}'_C$  ) і між точками  $N$  і  $n$  виникає різниця потенціалів, яка визначається за формулою:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N},$$

де  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  - комплексні значення фазних напруг генератора;  $\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a$ ,  $\underline{Y}_b = 1/\underline{Z}_b$ ,  $\underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c$  - провідності фаз споживача;  $\underline{Y}_N = 1/\underline{Z}_N$  - провідність опору між точками  $N$  і  $n$ , якщо він є. Однак у нашому випадку (за відсутності нейтрального проводу)  $\underline{Z}_N \rightarrow \infty$ , а  $\underline{Y}_N \rightarrow 0$ . Тому  $I_{nN} = 0$  та  $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$ .

Відповідно до другого закону Кірхгофа напруги на фазах несиметричного приймача в цьому режимі роботи визначаються так:

$$\begin{aligned}\dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}'_B &= \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_{nN},\end{aligned}\quad (2)$$



де  $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$  - напруги на фазах споживача,  $\dot{U}_A, \dot{U}_B$  - на фазах генератора.

## 2. Схема з'єднання в трифазних колах "трикутник-трикутник"

Векторну діаграму несиметричної зірки будують так, як показано на рис. 3.6. Вектори фазних напруг генератора, зсунуті на кут  $120^\circ$ . Точка  $N$  відповідає потенціалу нейтральної точки генератора, зручно потенціал точки  $N$  дорівнювати нулю. Лінійні напруги визначаються і будуються згідно з системою рівнянь (1), вектори фазних напруг приймача – згідно (2).

Фазні струми на навантаженні згідно з законом Ома :

, , ,

Ступінь несиметрії фазних напруг залежить від ступеня несиметрії навантаження. Оскільки опори фаз можуть змінюватися в широких межах, то будуть сильно змінюватися за значенням й фазні напруги: на одних приймачах (фазах) напруга може стати значно більшою, а на інших значно меншою від номінальної фазної напруги, на яку розрахований приймач, а це неприпустимо.

Крім того, в такому режимі роботи (при несиметричному навантаженні і без нейтрального проводу) фази приймача стають неавтономними: це означає, що якщо змінювати опір однієї фази, то одночасно будуть змінюватися струми й напруги на всіх трьох фазах приймача.

Із всього сказаного випливає, **що робота несиметричного приймача, з'єднаного зіркою, без нульового провідника є аварійним режимом**, і для його уникнення необхідно застосовувати нейтральний провід.

*в) випадок з нейтральним проводом*

При присутності нейтрального проводу *фазні напруги несиметричного приймача створюватимуть симетричну систему напруг*:

$$\dot{U}'_A = \dot{U}'_B = \dot{U}'_C ,$$

які, як і у випадку симетричного навантаження, зв'язані з лінійною напругою за формулою: .

Лінійні струми дорівнюють фазним (  $I_\lambda = I_\phi$  ).

Струми фаз будуть несиметричними й незалежними, тобто при зміні опору фази “Ф” буде змінюватися струм тільки у фазі *A*, а у фазах *B* і *C* - струми змінюватися не будуть.

Струм нейтрального провідника дорівнює:

$$\dot{I}_{nN} = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c ,$$

або їх геометричній сумі  $I_{nN} = I_a + I_b + I_c$  .

## Лекція 10

**Тема: Потужності в трифазних колах. Коефіцієнт потужності його важливість для ефективності енергогосподарства**

**Мета:** Вивчити потужності діючі у трехфазних колах

**Запитання лекції:**

1. Розрахунок потужностей трифазних кіл.
2. Коефіцієнт потужності його важливість для ефективності енергогосподарства

Потужність трифазного кола, незалежно від способу з'єднання споживача ("зірка" або "трикутник"), складається з потужностей окремих фаз. Таким чином активна потужність трифазної системи дорівнює сумі активних потужностей окремих фаз.

### 1. Розрахунок потужностей трифазних кіл

Потужність трифазного кола, незалежно від способу з'єднання споживача ("зірка" або "трикутник"), складається з потужностей окремих фаз.

Миттєва потужність трифазної системи дорівнює сумі миттєвих потужностей окремих фаз:

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (1)$$

Активна потужність (середня за період потужність):

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_a \cdot dt + \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_b \cdot dt + \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_c \cdot dt = \\ &= U_a \cdot I_a \cdot \cos \varphi_a + U_b \cdot I_b \cdot \cos \varphi_b + U_c \cdot I_c \cdot \cos \varphi_c \end{aligned} \quad (2)$$

Таким чином активна потужність трифазної системи дорівнює сумі активних потужностей окремих фаз.

При симетричному навантаженні активна потужність трифазної системи визначається за формулою:

$$P = 3 \cdot P_\Phi = 3 \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_\pi \cdot I_\pi \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

Реактивною потужністю трифазної системи називається алгебраїчна сума реактивних потужностей окремих фаз:

$$Q = U_a \cdot I_a \cdot \sin \varphi_a + U_b \cdot I_b \cdot \sin \varphi_b + U_c \cdot I_c \cdot \sin \varphi_c$$

При симетричному навантаженні реактивні потужності окремих фаз є рівними, тому:

$$Q = 3 \cdot Q_\Phi = 3 \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_\pi \cdot I_\pi \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

Аналогічно повна потужність трифазної системи у загальному випадку визначається за формулою:

$$S = S_a + S_b + S_c, \quad (5)$$

а при симетричному навантаженні:

$$S = 3 \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} \cdot U_\pi \cdot I_\pi \quad (6)$$

### 3. Коефіцієнт потужності його важливість для ефективності енергогосподарства ( $\cos \varphi$ )

При симетричному навантаженні фаз миттєві потужності в окремих фазах визначаються за формулами:

$$p_a = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos \varphi - \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi);$$

$$p_b = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \cdot I_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3} - \varphi\right) =$$

$$= \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos \varphi - \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3} - \varphi) ; \text{Очевидно, що}$$

$$\frac{U_m \cdot I_m}{2} = U_\Phi \cdot I_\Phi ,$$

$$\frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos \varphi + \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3} - \varphi) + \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos \varphi + \\ + \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \frac{8 \cdot \pi}{3} - \varphi) = 0$$

Тому сума миттєвих значень дорівнює:

$$p = p_a + p_b + p_c = 3 \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi \cdot \cos \varphi = 3 \cdot P_\Phi = P \quad (7)$$

При симетричному навантаженні фаз сума миттєвих потужностей не залежить від часу і дорівнює активній потужності. У цьому випадку трифазна система називається *урівноваженою*. З цього випливає, що трифазний електричний двигун розвиває на валу постійну потужність, тоді як однофазн

## Лекція 11

**Тема: Магнітні кола. Основні параметри і характеристики. Порядок розрахунку магнітних кіл.**

**Мета:**

**Запитання лекції:**

1. Магнітні кола: основні поняття.
2. Криві намагнічування. Петля гістерезису

### 3. Розрахунок нерозгалужених магнітних кіл. Пряма задача

#### 1. Магнітні кола: основні поняття

**Магнітне коло** - це коло, яке складається з елементів ( котушки, осердя ), що забезпечують створення магнітного поля необхідної конфігурації, інтенсивності та спрямованості.

*Магнітне поле є складовою електромагнітного поля, утворюється струмами, рухомими зарядами і має здатність діяти на рухомі заряди (струм).*

Існують магнітні кола: а) сталого струму; б) змінного струму.

В першому випадку ми маємо стале магнітне поле, в другому – змінне.

*Стале* магнітне поле утворюється намагніченими тілами (сталими магнітами) або при проходженні сталого струму по котушці. *Змінне* магнітне поле утворюється при проходженні змінного струму через котушку.

Магнітне поле проявляє як *індукційну*, так і *силову* дію.

*Індукційна дія* магнітного поля проявляється при явищі електромагнітної індукції і пояснюється законом Фарадея:

$$e = - w \, d\Phi / dt,$$

де

$w$  - кількість витків,

$e$  – миттєве значення ЕРС;

$\Phi$  – магнітний потік.

Крім цього, *індукційна дія* магнітного поля проявляється при русі провідника в магнітному полі:  $E = B l v$ , де  $l$  - довжина провідника,  $v$  – швидкість переміщення провідника в магнітному полі,  $B$  - індукція магнітного поля.

*Силова дія* магнітного поля проявляється в русі провідника зі струмом під дією магнітного поля і описується законом Ампера:  $F = B I l \sin \alpha$ , де  $I$  – величина струму,  $\alpha$  – кут між лінією магнітної індукції і напрямком струму.

*Силіві і індукційні (або енергетичні) властивості* магнітного поля як **матеріального посередника** при перетворенні енергії використовуються в

електротехніці в електричних машинах, трансформаторах, трансформаторах, електровимірювальних приладах, електромагнітах.

Для підсилення магнітного поля необхідно послабити магнітний опір середовища. Для цього використовують такі магнітні матеріали, як феромагнетики.

#### 4.2. Властивості та характеристики феромагнітних матеріалів

Всі речовини за своїми магнітними властивостями поділяються на

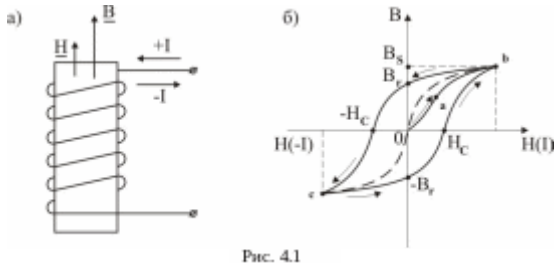
- діамагнетики (речовини, які при внесенні їх у зовнішнє магнітне поле, послаблюють його; відносна магнітна проникність діамагнетиків  $\mu < 1$ );
- парамагнетики (речовини, які при внесенні їх в зовнішнє магнітне поле, підсилюють його; відносна магнітна проникність парамагнетиків  $\mu > 1$ );
- феромагнетики (речовини, які при внесенні в зовнішнє магнітне поле, сильно посилюють його; відносна магнітна проникність таких речовин  $\mu_r \gg 1$ ).

(Примітка: Відносною магнітною проникністю  $\mu_r$  називають величину, яка показує, в скільки разів збільшиться індукція магнітного поля  $B$  (збільшиться поле), якщо замість вакууму застосувати даний матеріал).

В електротехніці використовуються феромагнетики. Всередині феромагнетика існують магнітні взаємодії між атомами (взаємодія орбітальних і спінових магнітних моментів), які насамперед визначають процеси намагнічування та перемагнічування феромагнетика. Зокрема спін-спінові взаємодії приводять до того, що весь об'єм феромагнітного тіла ділиться на велику кількість областей із спонтанною намагніченістю, які називають доменами. Всередині домену мільярди атомів орієнтовані своїми магнітними моментами паралельно один одному. Кожен домен намагнічений до насичення в даному напрямку, відмінному від напрямку намагніченості сусідніх доменів. Між сусідніми доменами з різним напрямом намагніченості є перехідні шари, всередині яких вектор намагніченості поступово повертається від одного напрямку до іншого. Цей перехідний шар називають границею доменів. Якщо розмагнічене феромагнітне тіло з безладним розташуванням доменів помістити в магнітне поле, то магнітні моменти доменів перерозподіляються і з'явиться складова намагніченості всього тіла в напрямі зовнішнього магнітного поля.

## 2. Криві намагнічування. петля гістерезису

Як приклад, розглянемо котушку із змінним струмом, навиту на феромагнітне осердя (рис. 4.1, а). При намагнічуванні феромагнетику із збільшенням напруженості поля  $H$  (із збільшенням струму в котушці) все



більша кількість доменів розвертається вздовж зовнішнього магнітного поля  $H$ , що збільшує магнітну індукцію  $B$  (рис. 4.1, б (точка “a”)). Потім приріст магнітної індукції зменшується за рахунок того, що вже всі домени

феромагнетику повернулися вздовж магнітного поля  $H$  і настає стан магнітного насичення (рис. 4.1, б (точка “b”)). При зміні струму (за величиною і напрямком) в котушці відбувається перемагнічування осердя. Так, при зменшенні струму напруженість  $H$  цього струму зменшується, магнітна індукція  $B$  теж зменшується, але за кривою, яка не співпадає з кривою початкового намагнічування ( $Oab$ ) і при  $H = 0$   $B = B_r$  (рис. 4.1, б).

Розмагнічування осердя якби запізнюється порівняно із зменшенням напруженості поля  $H$ . Це явище називається *магнітним гістерезисом*, а значення  $B_r$  - *остаточною індукцією*.

Значення напруженості поля  $H_c$ , необхідне для повного розмагнічування феромагнетику ( $B=0$ ), називається коерцитивною силою.

Одержаний при перемагнічуванні речовини графік (рис. 4.1, б) називається *петлею гістерезису*.

Перемагнічування феромагнетику супроводжується рухом його доменів. В результаті осердя нагрівається, що приводить до втрат енергії, які називаються *втратами на гістерезис*.

Значення втрат енергії на гістерезис прямо пропорційні площі, яка обмежується петлею гістерезису.

Всі феромагнітні матеріали, що застосовуються в електротехніці, діляться на три основні групи: *магнетом'яккі*, *магнетотверді* та *матеріали спеціального призначення*.

Характерною властивістю магнетом'яких матеріалів є їх здатність намагнічуватися до насичення вже в слабких полях. Вони мають високу магнітну проникність і малі втрати на перемагнічування (вузьку петлю гістерезису), малу коерцитивну силу ( $H_c \leq 400 \text{ А/м}$ ).

Магнітом'які матеріали застосовуються для виготовлення магнітопроводів електричних машин, трансформаторів, електричних апаратів та тощо.

До магнітом'яких матеріалів відносяться технічно чисте залізо (низько вуглецева електротехнічна сталь, електролітичне і карбонільне залізо), електротехнічні сталі (сплав заліза та кремнію), пермалої (сплав різного процентного вмісту заліза й нікелю і, крім того, леговані молібденом, хромом, нікелем, алюмінієм тощо), ферити.

Технічно чисте залізо дешевше, легко обробляється, має високі магнітні властивості в постійних магнітних полях. Внаслідок низького питомого електричного опору залізо застосовують тільки в постійних магнітних полях.

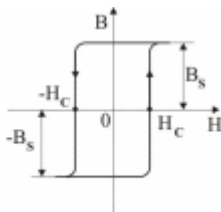


Рис. 4.2

Електротехнічні сталі мають високі магнітні властивості і високий питомий електричний опір, що призводить до значного зменшення втрат на вихрові струми. Ці сталі застосовують для виготовлення магнітопроводів електричних машин, трансформаторів, дроселів та інших пристроїв при роботі в полях промислової частоти (50-60 Гц), а також для частот 400-500 Гц в області малих, середніх і сильних полів.

Основні переваги пермалою – дуже високе значення магнітної проникності в слабких полях (в 10-15 разів більше, ніж у листової сталі), мале значення коерцитивної сили. Індукція насичення досягається при малих напруженостях поля. Вони мають прямокутну петлю

гістерезису (рис. 4.2). Пермалої застосовуються в магнітних елементах вимірювальних автоматичних і радіотехнічних пристроїв при роботі в слабких постійних і змінних полях з частотою до декількох десятків кілогерц, а для мікронного прокату – і до вищих частот.

Ферити – це твердий розчин феромагнітних й не феромагнітних речовин: суміш окису заліза, цинку, марганцю та інших елементів. Вони мають великий питомий опір ( $\rho = 10^5 - 10^{12} \text{ Ом.мм}^2/\text{м}$ ), тому втрати на вихрові струми малі й їх можна застосовувати при високих частотах. Магнетом'які ферити застосовують при виготовленні осердь різного роду трансформаторів,

катушок індуктивності фільтрів, статорів і роторів високочастотних двигунів, деталей телевізійної апаратури. В постійних полях і при низьких частотах ферити не застосовуються.

Магнетотверді матеріали (матеріали для виготовлення постійних магнітів), повинні мати велику залишкову магнітну індукцію  $B_r$  й велику коерцитивну силу  $H_c$  - тобто вони мають широку петлю гістерезисну. Втрати на гістерезис (втрати на повертання доменів) для магнетотвердих матеріалів не мають значення, тому що вони намагнічуються тільки один раз.

### 3. Розрахунок нерозгалужених магнітних кіл

#### Пряма задача

Вихідні дані для розрахунку. Як правило, задається схема (ескіз) магнітного кола (рис. 13.3) і геометричні розміри: довжина середньої магнітної лінії кожної ділянки  $l_1, l_2, l_3, l_4$  і повітряних зазорів  $\delta_1, \delta_2$ , площу поперечного перерізу ділянки  $S_1, S_2, S_3, S_4$ ;  $S_{\delta 1}$  беруть такою, що дорівнює  $S_3$ , а  $S_{\delta 2} = S_2$ ; відомі також матеріали, з яких виготовлені окремі ділянки кола (тобто їх криві намагнічування). Задається також робочий магнітний потік  $\Phi_p$ .

Визначити намагнічуючу силу обмоток електромагніта  $F = I_1 w_1 - I_2 w_2$ . Знак “-” перед  $I_2 w_2$  означає, що напрям МРС  $F_1$  і  $F_2$ , які визначаються за правилом правої руки, спрямовані в різні боки (див. схему 13.4). Якщо змінити напрям струму в одній з обмоток, то

$$F = I_1 w_1 + I_2 w_2$$

Розв’язання. Магнітопровід розбивають на окремі ділянки. Ознаки розбивання: наявність або відсутність обмотки, однорідність матеріалу магнітопроводу, однорідність поперечного перерізу ділянки магнітопроводу.

За кресленням визначають середню довжину  $l_k$  і площу поперечного перерізу  $S_k$  кожної ділянки магнітопроводу. Індекс  $k$  набуває значень 1, 2, 3 і т.д. (тобто  $k$ -та ділянка). Результати записують у табл. 13.1.

Якщо потрібно обчислити потік розсіяння, то в загальному випадку можна вважати, що робочий потік на 10% менший від загального (повного) потоку  $\Phi_s = 0.1 \Phi_n$ , де  $\Phi_s, \Phi_n$  – відповідно потік розсіяння і повний потік. Отже,

$$\Phi_n = \Phi_p + \Phi_s,$$

де  $\Phi_p$  – робочий потік.

Вважається, що на ділянці кола, де розмішена обмотка, діє повний потік, а на ділянках кола, де обмотки відсутні, – робочий (рис. 13.8)

Розрахунок виконуємо за робочим потоком. Позначимо  $\Phi_p = \Phi$ . Далі обчислюють магнітну індукцію кожної ділянки:

$$B_k = \Phi_k / S_k \quad (13.3)$$

і результати заносять у табл. 13.1.

За кривими намагнічування  $B = f(H)$  і за відомою  $B_k$  знаходять  $H_k$  для кожної ділянки кола. Для повітряних зазорів  $H_\delta = B_\delta / \mu_0$ . Результати заносять у табл. 13.1.

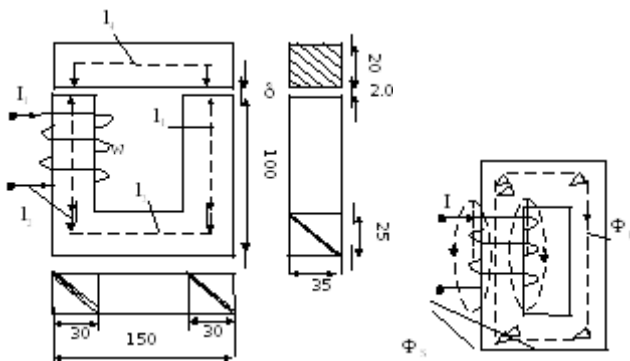


Рис.2 Рис.3

Обчислюють добуток  $H_k l_k$  для кожної ділянки кола. Результати заносять у табл. 13.1.

Знаходять шукану МРС  $\sum H_k l_k$  додаванням цифр останнього стовпця табл. 13.1:

$$F_1 - F_2 = \sum H_k l_k$$

Тобто

$$I_1 w_1 - I_2 w_2 = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_{\delta 1} \delta_1 + H_{\delta 2} \delta_2. \quad (13.4)$$

Отже,  $F = F_1 - F_2 = I_1 w_1 - I_2 w_2$  знайдена. Якщо додаткових вимог у задачі немає, то вона вважається розв'язаною.

Приклад розрахунку нерозгалуженого магнітного кола.

Задача. Визначити намагнічуючий струм котушки, необхідний для утворення робочого магнітного потоку  $\Phi_p = 8 \cdot 10^{-4}$  Вб в нерозгалуженому магнітному колі (рис. 13.7). Матеріал осердя – сталь Е11, матеріал якоря – сталь Е42. Число витків намагнічуючої котушки  $w = 1000$ . Потік розсіювання  $\Phi_s = 0,1\Phi_p$ .

## Лекція 12

**Тема: Трансформатори. Призначення і класифікація, галузі застосування трансформаторів. Будова і принцип дії однофазного трансформатора. Коефіцієнт трансформації.**

**Мета:** Вивчити пристрій та принцип роботи трансформатора

**Запитання лекції:**

1. Загальні відомості про трансформатори.
2. Принцип роботи однофазного трансформатора.
3. Будова і принцип дії однофазного трансформатора. Коефіцієнт трансформації.

### 1. Загальні відомості про трансформатори

**Трансформатор** (від лат. *transformo* — перетворювати) — пристрій для перетворення параметрів (амплітуд і фаз) напруг і струмів.

Трифазний силовий масляний трансформатор з вирізом у баку для демонстрації конструкції. Установка трансформатора на відкритому повітрі. Силовий трансформатор 110/35/10кВ потужністю 63МВА

Трансформатор — статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно зв'язані обмотки і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або кількох систем (напруг) змінного струму в одну або декілька інших систем (напруг) змінного струму без зміни частоти системи (напруги) змінного струму<sup>[2]</sup>.

Трансформатори широко застосовуються в лініях електропередач, в розподільних та побутових пристроях. На високій напрузі й з малою силою струму передавання електроенергії відбувається з меншими втратами. Тому, зазвичай лінії електропередач є високовольтними. Водночас побутові й промислові машини вимагають великої сили струму й невеликої напруги, тож перед споживанням електроенергія перетворюється на низьковольтну. Трансформатори знайшли застосування також у різних випрямних, підсилювальних, сигналізаційних та інших пристроях.

Коефіцієнт корисної дії сучасних трансформаторів, особливо підвищеної потужності, вельми високий і досягає значень 0,95...0,996.

## 2. Принцип роботи однофазного трансформатора.

Найпростіший трансформатор зображений на рис.5.1. Розглянемо фізичні процеси, що проходять у ньому.

При живленні первинної обмотки змінним струмом частотою  $f$  буде створюватися змінний магнітний потік

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t, \text{ Вб.} \quad (5.1)$$

Величина ЕРС, що індукована в одному витку обмотки, знаходиться на основі закону електромагнітної індукції:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \Phi_m \cdot \cos \omega t = E_m \cdot \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (5.2)$$

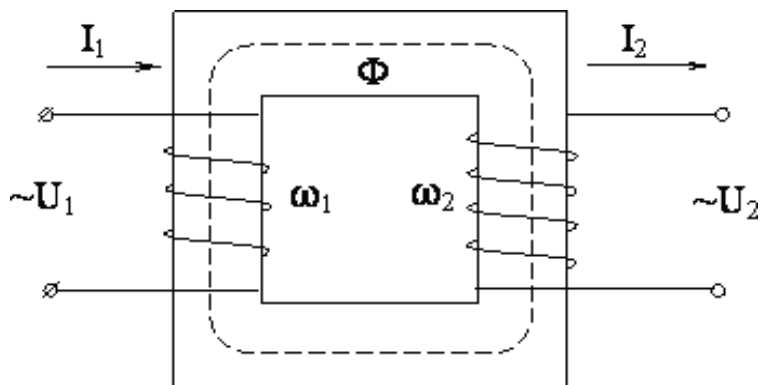


Рис.5.1 - Однофазний трансформатор.

ЕРС, що індукована, відстає за фазою від потоку на кут  $\frac{\pi}{2}$ .

Діюче значення ЕРС в одному витку:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m. \quad (5.3)$$

Якщо в первинній обмотці трансформатора  $v_1$  витків, то ЕРС первинної обмотки визначається за формулою:

$$E_1 = 4,44 \cdot \omega_1 \cdot f \cdot \Phi_m, \text{ В.} \quad (5.4)$$

Якщо у вторинній обмотці трансформатора  $v_2$  витків, то ЕРС вторинної обмотки визначається за формулою:

$$E_2 = 4,44 \cdot \omega_2 \cdot f \cdot \Phi_m, \text{ В.} \quad (5.5)$$

Відношення ЕРС первинної і вторинної обмоток (відношення чисел їх витків) називають **коефіцієнтом трансформації**:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (5.6)$$

Для трансформаторів, що знижують,  $k > 1$ ; для трансформаторів, що підвищують, -  $k < 1$ .

Якщо вторинну обмотку трансформатора з'єднати з приймачем електричної енергії, то під дією ЕРС цієї обмотки у вторинному колі трансформатора виникає струм  $i_2$ . Таким чином, електрична енергія за допомогою змінного магнітного поля передається з первинної обмотки трансформатора на вторинну.

При теоретичному аналізі роботи трансформатора часто вживають поняття реальний трансформатор, ідеалізований трансформатор, зведений трансформатор.

### **3.Будова і принцип дії однофазного трансформатора. Коефіцієнт трансформації**

**Реальний трансформатор** має обмотки, розташовані на осерді. Обмотки мають як активний опір, так і опір розсіювання (крім основного магнітного потоку, є потоки розсіювання первинної та вторинної обмоток).

**Ідеалізований трансформатор** це трансформатор, у котрого відсутні магнітні потоки розсіювання, а активні опори обмоток дорівнюють нулю.

**Зведений трансформатор** - еквівалентний реальному трансформатор, у якого коефіцієнт трансформації дорівнює одиниці. Для заміщення реального трансформатора зведеним треба витримати принципи еквівалентності енергетичного стану. Зведені електричні величини у цьому випадку позначаються штрихами.

#### **Режим холостого ходу трансформатора.**

Холостим ходом називають режим роботи трансформатора, коли його первинна обмотка приєднана до кола змінного струму, а вторинна розімкнута. Особливість трансформатора полягає в тому, що за відсутності струму в колі вторинної обмотки струм у його первинній обмотці (струм холостого ходу) дуже малий. Розмір струму холостого ходу в 15-20 разів менше за величину струму первинної обмотки трансформатора при його повному навантаженні.

Невеличкий струм холостого ходу створює мале падіння напруги ( $I_{10} \times r_1$ ) в опорі  $r_1$  первинної обмотки (його величина не перевищує 0,5% від величині прикладеної напруги  $U_1$ ). Основна частина прикладеної напруги урівноважена ЕРС  $e_1$  первинної обмотки. Тому, нехтуючи незначним падінням

напруги в первинній обмотці при холостому ході трансформатора, можна вважати

$$e_1 \approx u_1. \quad (5.7)$$

Якщо напруга, прикладена до первинної обмотки, змінюється в часі за синусоїдальним законом, то урівноважуюча його ЕРС первинної обмотки також буде змінюватися за синусоїдальним законом:

$$e_1 = E_{M1} \cdot \sin \omega t. \quad (5.8)$$

ЕРС вторинної обмотки створюється тим же магнітним потоком, що й ЕРС первинної обмотки. Тому

$$e_2 = E_{M2} \cdot \sin \omega t. \quad (5.9)$$

Оскільки величина ЕРС  $e_1$  практично дорівнює величині прикладеної напруги  $u_1$ , а напруга на розімкнутих затискачах вторинної обмотки чисельно дорівнює ЕРС  $e_2$ , то вираз для коефіцієнта трансформації можна записати у вигляді:

$$k = \frac{w_2}{w_1} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{E_{M2}}{E_{M1}} = \frac{E_2}{E_1} \approx \frac{U_2}{U_1}. \quad (5.10)$$

Отже, коефіцієнт трансформації приблизно може бути визначений відношенням величин напруг на затискачах первинної і вторинної обмоток трансформатора при холостому ході.

Підбираючи число витків  $w_2$  вторинної обмотки, можна за заданого значення первинної напруги  $U_1$  одержати бажану величину напруги  $U_2$  на затискачах вторинної обмотки.

Векторна діаграма для холостого (неробочого) ходу трансформатора подібна векторній діаграмі котушки індуктивності

Для холостого ходу трансформатора можна записати:

$$\Phi = \frac{E_1}{4,44 \cdot w_1 \cdot f} = \frac{U_1}{4,44 \cdot w_1 \cdot f}, \quad (5.12)$$

звідкіля випливає, що при збільшенні первинної напруги вище номінальної, внаслідок насичення, різко збільшується струм холостого ходу, і трансформатор працює в пожежонебезпечному режимі.

### Лекція 13

**Тема:** Електричні кола з розподіленими параметрами, поняття погонних ємностей, індуктивності і опору.

**Мета:** Вивчити особливості елементів із розподіленими параметрами (довгих ліній).

**Запитання лекції:**

1. Загальні відомості про елементи з розподіленими параметрами
2. Первинні параметри лінії

#### 1. Загальні відомості про елементи з розподіленими параметрами .

##### *Основні поняття та означення*

У попередніх лекціях розглядалися коливання , які змінюються тільки у часі. Але існують також коливання (сигнали), які змінюються як у часі, так і у просторі. Такий сигнал зветься *хвилею*.

Кола з *розподіленими* параметрами характеризуються існуванням в них хвильових процесів, за яких напруга  $u(t, l)$  і струм  $i(t, l)$  змінюються не тільки за часом , але і у просторі. Характер змінювання цих величин у просторі може бути подібним до закону їх змінювання у часі. Якщо, наприклад, на вході кола діє синусоїдна ЕРС, то в будь-якій точці кола з координатою  $l_0$  значення напруги (струму) повторюється через період  $T$ :  $u(t, l_0) = u(t + T, l_0)$  . При цьому в будь-який фіксований момент часу  $t_0$  значення напруги (струму) може повторюватися через деякий просторовий інтервал  $\Delta l = \lambda$  :  $u(t_0, l) = u(t_0, l + \lambda)$  (рис.15.1). Величина  $\lambda$  зветься *довжиною хвилі*.

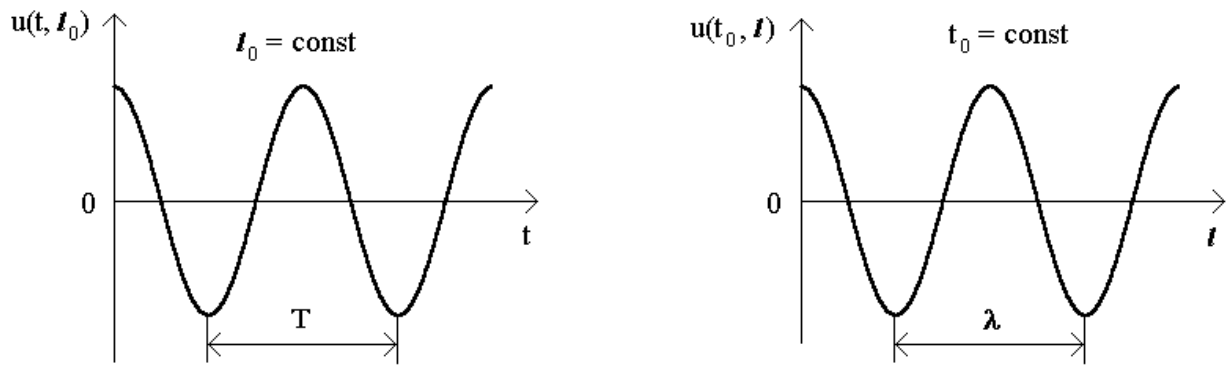


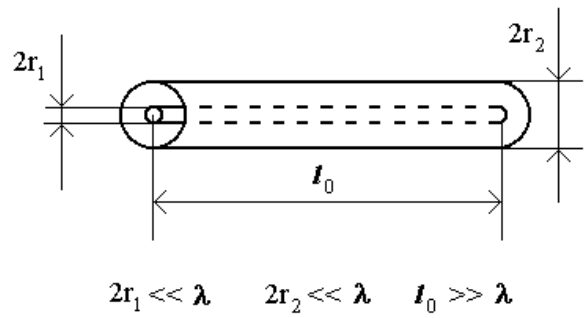
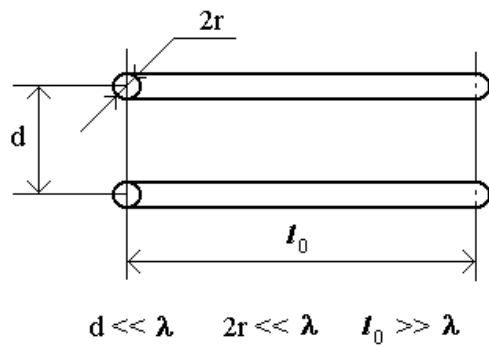
Рисунок .1

Загалом коло характеризується трьома лінійними розмірами  $x, y, z$ . Якщо  $x \ll 1$  ;  $y \ll 1$  ;  $z \ll 1$  , то коло є системою з зосередженими параметрами. При цьому, по-перше, час запізнення електромагнітних коливань у колі  $\Delta t$  значно менший за період коливань генератора,  $\Delta t \ll T$  ; а по-друге, миттєве значення напруги (струму) однакове у будь-якій точці кола.

Із зменшенням довжини хвилі (інакше, із збільшенням частоти  $f$ ) вказані умови не виконуються, і тоді коло буде системою з розподіленими параметрами (хвильоводною системою).

Розглянемо окремий випадок хвильоводних систем, у яких  $x \gg \lambda$  ;  $y \ll \lambda$  ;  $z \ll \lambda$  . Такі системи звуться колами з лінійно-розподіленими параметрами або електричними довгими лініями. Струм і напруга в лінії є функціями лінійної координати  $x$  (або  $l$ ).

Довгі лінії є основним елементом будь-якої системи електрозв'язку. В техніці радіозв'язку прикладом ліній є так звані фідери. Наприклад, двопровідна лінія зв'язку (рис.15.2а) і коаксіальна лінія (рис.15.2б). Лінії використовуються для передавання електромагнітної енергії від передавача до антени, від антени до приймача та ін. Довгі лінії (ДЛ) застосовуються також як елементи радіоапаратури в діапазоні НВЧ (фазообертачі, лінії затримки тощо).

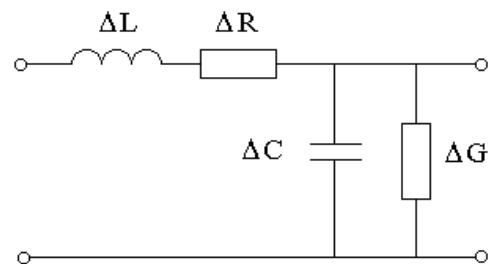
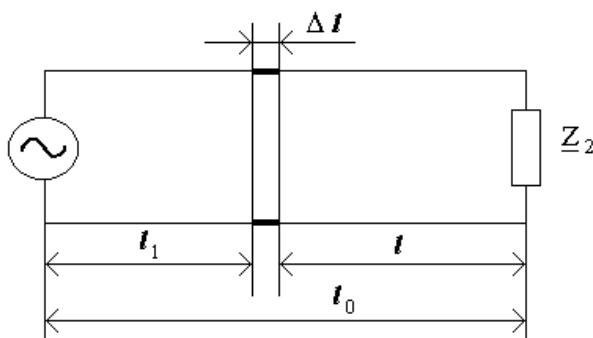


а) б)

Рисунок .2

## 2. Первинні параметри довгої лінії

Безпосередньо описати систему з розподіленими параметрами за допомогою рівнянь Кірхгофа неможливо, тому що миттєві значення напруги і струму залежать від розміру кола та часу розповсюдження електромагнітних хвиль. Разом з тим, будь-яку ділянку лінії довжиною  $\Delta l$  можна подати у вигляді еквівалентної схеми, яка складається з зосереджених нескінченно малих елементів  $\Delta R$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta C$ , для яких закони теорії кіл слушні повною мірою (рис..3а,б).



а) б)

Рисунок .3

Для кількісної оцінки величин  $\Delta L$ ,  $\Delta R$ ,  $\Delta C$ ,  $\Delta G$  використовуються так звані первинні параметри лінії, які розраховуються на одиницю довжини:

$$L_0 = \frac{dL}{dl} \text{ — первинна індуктивність, Гн/м (мкГн/м);}$$

$C_0 = \frac{dC}{dl}$  – первинна ємність, Ф/м (пФ/м);

$R_0 = \frac{dR}{dl}$  – первинний опір втрат, Ом/м;

$G_0 = \frac{dG}{dl}$  – первинна провідність, См/м.

Якщо відомі первинні параметри, тоді  $\Delta R = R_0 \Delta l$  ;  $\Delta G = G_0 \Delta l$  ;  $\Delta L = L_0 \Delta l$  ;  $\Delta C = C_0 \Delta l$  . Первинні параметри залежать від частоти і конструкції лінії. Формули для розрахунку первинних параметрів визначаються в теорії поля і наводяться у довідниковій та навчальній літературі .

Якщо первинні параметри не змінюються вздовж лінії, то лінія зветься *однорідною*. При синусоїдній дії використовують поняття первинного комплексного опору і первинної комплексної провідності:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0 \ ; \ \underline{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$$

## Лекція 14

### Тема: Поняття характеристичного опору

**Мета:** Вивчити особливості вторинного параметра довгої лінії – імпеданс (хвильовий опір)

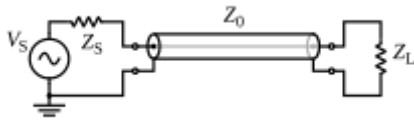
#### Запитання лекції:

1. Характеристичний імпеданс (хвильовий опір)
2. Модель лінії передачі енергії. Основне визначення
3. Передавальний імпеданс навантаження

### 1. Характеристичний імпеданс (хвильовий опір)

**Характеристичний імпеданс** (англ. *characteristic impedance*) або **імпеданс поширення/переносу** (англ. *surge impedance*) типової лінії передачі, котрий позначається як  $Z_0$ , є відношенням амплітуд *одиної* пари величин — напруги та струму електромагнітної хвилі, що поширюється/передається вздовж лінії за відсутності відбиття на неоднорідностях лінії. В SI величина характеристичного імпедансу вимірюється в омах. Характеристичний

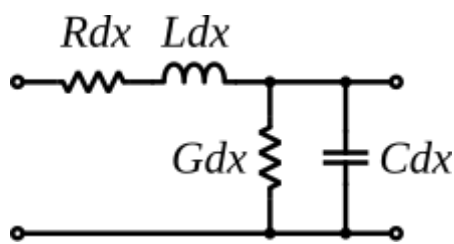
імпеданс лінії передачі без втрат є чисто реальна/дійсна величина, з нульовою уявною компонентою.



Характеристичний імпеданс в цьому випадку проявляє себе як звичайний опір, на якому дисипативні втрати енергії будуть відсутні за умови *самопогодження* з опором навантаження. Лінія передачі кінцевої довжини (з втратами, чи без них) з активним опором навантаження на кінці лінії, рівним характеристичному імпедансу ( $Z_L = Z_0$ ), є лінією нескінченної довжини відносно до джерела змінної напруги.

## 2. Модель лінії передачі енергії. Основне визначення

Відношення прикладеної напруги до струму називається вхідним імпедансом; вхідний імпеданс лінії передачі нескінченної довжини називається характеристичним імпедансом.



Схематичне зображення елементарних компонент лінії передачі.

Використовуючи модель лінії передачі, яка ґрунтується на телеграфних рівняннях, загальний вираз для характеристичного імпедансу лінії передачі буде:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

де

- опір на одиницю довжини,
- індуктивність на одиницю довжини,
- провідність на одиницю довжини,
- ємність на одиницю довжини,
- уявна одиниця,
- кутова частота.

Фазори/комплексна амплітуда відношення напруг до струмів лінії передачі пов'язані з характеристичним імпедансом як:

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

де суперскріпти + та - відображають передню- та задню біжучі хвилі, відповідно. Для лінії без втрат R та G дорівнюють нулю, тому рівняння для характеристичного імпедансу спрощується

### 3. Передавальний імпеданс навантаження

При передачі електричної енергії характеристичний імпеданс лінії передачі виражається в термінах передавальний імпеданс навантаження (ПІН) (англ. *surge impedance loading, SIL*), або природне навантаження, будучи

MW-навантаженням, при якому відсутні генерація та поглинання: де — лінія-до-лінії напруга у вольтах.

Навантажена знизу ПІН, лінія передачі повільно переміщує енергію до системи, намагаючись збільшити напругу системи. Вище цього значення лінія поглинає реактивну енергію, намагаючись знизити напругу. Ефект Феррарі описує підсилення по напрузі на кінці слабко навантаженої (або

зовсім ненавантаженої — відкритої) лінії передачі. В середині кабелю, як правило, дуже низький характеристичний імпеданс, який продукується в ПІН так, що типово перевищується термальна межа для кабелю, тобто він завжди є джерелом повільної зміни реактивної енергії.

## Лекція 15

**Тема: Режим роботи довгих ліній. Режим біжучої та стоячої хвилі в довгій лінії.**

**Мета:** Вивчити фізичний сенс хвиль у довгих лініях

**Запитання лекції:**

1. Біжуча хвиля
2. . Стояча хвиля

### 1. Біжуча хвиля

Біжуча хвиля — хвильовий рух, під час якого поверхня рівних фаз (фазові хвильові фронти) переміщується зі скінченною швидкістю (постійною для однорідного середовища). Прикладами можуть слугувати пружні хвилі у стрижні, стовпі газу чи рідини, електромагнітна хвиля вздовж довгої лінії або у хвилеводі.

На відміну від стоячих хвиль, біжучі хвилі під час поширення в середовищі переносять енергію. З біжучою хвилею, групова швидкість якої відрізняється від нуля, пов'язане перенесення енергії, імпульсу чи інших характеристик процесу.

Еволюцію біжучої хвилі в часі та просторі можна описати виразом: де амплітудна обгортка хвилі, хвильове число, а фаза коливань. Фазова швидкість цієї хвилі задається виразом де довжина хвилі.

### Часткові випадки

Стояча хвиля є частковим випадком біжучої хвилі з , де групова швидкість хвилі. Тобто, дві однакові періодичні біжучі хвилі (в рамках

справедливості принципу суперпозиції), що поширюються у протилежних напрямках, утворюють стоячу хвилю.

### **Частково біжуча хвиля**

Виникає за різних амплітуд. Характеризується або коефіцієнтом біжучої хвилі (КБХ), або коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХ), або коефіцієнтом відбиття  $\Gamma$ , до дорівнює відношенню амплітуд зустрічних хвиль:  $КСХ = 1 / КБХ = (1 + |\Gamma|^2) / (1 - |\Gamma|^2)$

За лініями передавань, оптимальне передавання енергії вимагає їх узгодження: отримання в лінії режиму біжучої хвилі —  $КСХ = 1$ ,  $\Gamma = 0$ .

Такий режим для ланцюгів із зосередженими параметрами відповідатиме рівності внутрішнього опору джерела опору навантажен

## **2. Стояча хвиля**

**Стояча (стійна, нерухома) хвиля** — це хвиля, яка при будь-якій фазі коливань не поширюється в просторі. Характерною особливістю х. с. є наявність у ній вузлів, у яких амплітуда хвилі дорівнює нулю, та пучностей, у яких амплітуда максимальна, причому положення вузлів і пучностей лишається незмінним у просторі. Стояча хвиля утворюється в результаті накладання двох біжучих (рухомих) хвиль, які поширюються назустріч одна одній і мають деякий зсув фаз. У біжучій хвилі відбувається перенесення енергії, а в стоячій хвилі через площини, в яких розташовані вузли, енергія не перетікає. Для оптимальної передачі енергії лініями передач необхідне їхнє узгодження, тобто одержання всередині лінії режиму рухомої хвилі, коли коефіцієнт відбивання  $\Gamma = 0$ , а коефіцієнт стійності (нерухомості) хвилі  $КСХ (КНХ) = 1$ .

У випадку гармонічних коливань в одновимірному середовищі стояча хвиля описується формулою.

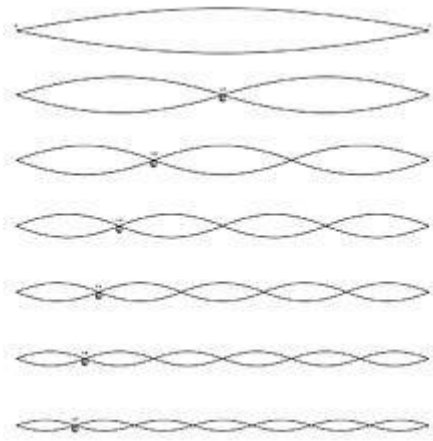
де  $u$  збурення в точці  $x$  в момент часу  $t$ , амплітуда стоячої хвилі, частота,  $k$  хвильовий вектор, фаза.

Стоячі хвилі є розв'язками тих же хвильових рівнянь. Їх можна уявити собі, як суперпозицію хвиль, що розповсюджуються в протилежних напрямках.

При існуванні в середовищі стоячої хвилі, існують точки, амплітуда коливань у яких дорівнює нулю. Ці точки називаються **вузлами** стоячої хвилі. Точки, в яких коливання мають максимальну амплітуду називаються **пучностями**.

Термін «стояча хвиля» увів близько 1860 року німецький фізик Франц Мельде і продемонстрував це явище в своєму класичному експерименті з вібруючими струнами<sup>[en][1][2][3][4]</sup>.

## Моди



Моди коливань струни

Стоячі хвилі виникають у резонаторах. Скінченні розміри резонатора накладають додаткові умови на існування таких хвиль. Зокрема, для систем скінченних розмірів хвильовий вектор (а, отже, довжина хвилі) може приймати лише певні дискретні значення. Коливання із певними значеннями хвильового вектора називаються **модами**.

Наприклад, різні моди коливань затиснутої на кінцях струни визначають її основний тон і обертони.

В одновимірному випадку дві хвилі однакової частоти, довжини хвилі та амплітуди, що розповсюджуються в протилежних напрямках (наприклад назустріч одна одній), будуть взаємодіяти в результаті чого може виникнути стояча хвиля. Наприклад, гармонічна хвиля розповсюджуючись вправо, досягаючи кінця струни, продукує стоячу хвилю. Хвиля, що відбивається від кінця повинна мати таку саму амплітуду та частоту, як і падаюча хвиля.

Розглянемо падаючу та відбиту хвилі у вигляді:

$$\{ \displaystyle u = u_{\{0\}} \cos kx \cos(\omega t - \varphi) \},$$

де:

- $y_0$  — амплітуда хвилі,
- — циклічна (кутова) частота, що вимірюється в радіанах за секунду,
- $k$  — хвильовий вектор, вимірюється в радіанах на метр, і є поділений на довжину хвилі ,
- $x$  та  $t$  — змінні для позначення довжини та часу.

## \Лекция 16

**Тема: Режим роботи довгих ліній. Режим змішаної хвилі.**

**Мета:** Вивчити хвилю, що виникає в реальній лінії.

**Запитання лекції:**

1. Поняття узгодженого навантаження.
2. Умови виникнення змішаної хвилі.

### 1.Поняття узгодженого навантаження.

В залежності від характеру і значення навантаження в лінії встановлюється один з трьох режимів: біжучої хвилі, стоячої хвилі та змішаних хвиль.

Найбільшого коефіцієнту корисної дії системи, що складається з генератора, лінії передачі і навантаження, можна досягти при утворенні **режиму біжучої хвилі**. Такий режим забезпечується при рівності вхідного опору генератора, хвильового опору лінії передачі і опору навантаження і називається **режимом узгодження**. При такому режимі амплітуда напруги і струму в кожному перетині лінії однакова (рис..3, а).

Якщо опір навантаження не дорівнює хвильовому опорі лінії - виникає відбита хвиля, що поширюється назустріч падаючій. У результаті інтерференції падаючої і відбитої хвиль рівних амплітуд у лінії встановлюється режим стоячих хвиль. У реальних умовах стоячі хвилі

виникають при короткому замиканні ( $Z_H=0$ ) або розмиканні лінії ( $Z_H \rightarrow \infty$ ). У тих перетинах лінії, де падаюча і відбита хвилі знаходяться у фазі, то результуюча напруга подвоюється по амплітуді, створюючи пучність, а в тих перетинах де падаюча і відбита хвилі знаходяться в протифазі, то результуюча напруга дорівнює нулю й утворюється вузол (рис. 1.3, б). Відстань між вузлами і пучностями дорівнює половині довжини хвилі в лінії.

## 2. Умови виникнення змішаної хвилі.

При інтерференції відбитої і падаючої хвиль нерівних амплітуд у лінії виникає **режим змішаних хвиль**. Для режиму змішаних хвиль характерні не пучності і вузли, а максимуми і мінімуми напруги (рис. 3, в).

Режим в лінії передачі і ступінь її узгодження з навантаженням характеризується коефіцієнтом відбиття  $\Gamma(x)$  або коефіцієнтом стоячої хвилі КСХ. Відношення комплексних амплітуд відбитої та падаючої хвиль називається коефіцієнтом відбиття:

$$\dot{\Gamma}(x) = \frac{\dot{U}_{\text{від}}}{\dot{U}_{\text{пад}}} e^{i\varphi}, \quad (1.9)$$

де  $\frac{U_{\text{від}}}{U_{\text{пад}}} = \Gamma$  - модуль коефіцієнта відбиття;

$\varphi$  – фаза коефіцієнта відбиття.

Зв'язок коефіцієнта відбиття з опором навантаження описується виразом:

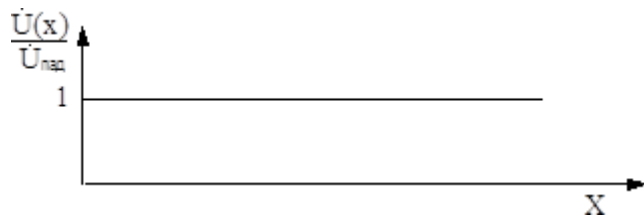
$$\dot{\Gamma}(x) = \frac{Z_H - Z_{XB}}{Z_H + Z_{XB}}. \quad (1.10)$$

Коефіцієнт стоячої хвилі визначається виразом:

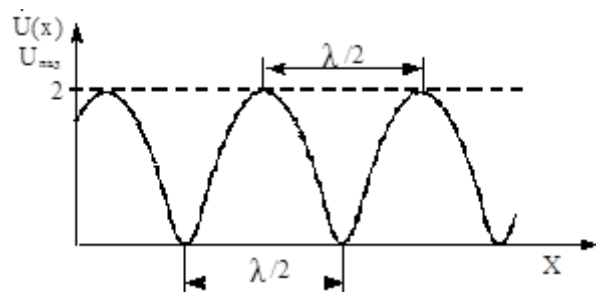
$$КСХ = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}}. \quad (1.11)$$

Коефіцієнт стоячої хвилі пов'язаний з модулем коефіцієнта відбиття наступним співвідношенням:

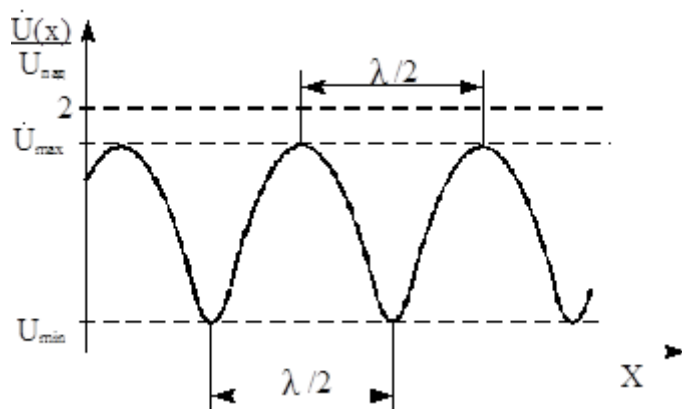
$$КСХ = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}, \text{ або } \Gamma = \frac{КСХ-1}{КСХ+1}. \quad (1.12)$$



а)



б)



в)

а – режим біжучої хвилі; б – режим стоячої хвилі; в – режим змішаної хвилі.

Рисунок 3 – Режимы работы довгих ліній

При ідеальному узгодженні навантаження ( $Z_H=Z_{\text{хв}}$ )  $\Gamma=0$ ,  $K_{\text{СХ}}=1$ .

При короткому замиканні ( $Z_H=0$ ) і холостому ході лінії ( $Z_H \rightarrow \infty$ ), а також при навантаженні лінії реактивним опором в лінії виникає режим стоячих хвиль. При цьому режимі  $\Gamma=1$ , а  $K_{СХ} \rightarrow \infty$ .

Коли опір навантаження не дорівнює хвильовому опору лінії, ( $Z_H \neq Z_{ХВ}$ ) в ній виникає режим змішаних хвиль. В цьому випадку  $1 > \Gamma > 0$ , а  $K_{СХ} > 1$ .

## Лекція 17

**Тема:** Елементи техніки надзвичайних частот, ВЧ кабелі, хвилеводи, трійники, мости.

**Мета:** Ознайомитися з конструкцією та властивостями елементів НВЧ

Запитання лекції:

1. Хвилевід.
2. Коаксіальний кабель
3. Подвійний хвилевод трійник,

### 1.Хвилевід

**Хвилевід (електромагнітний)** — лінія передачі, яка описується телеграфними рівняннями (в загальному випадку рівняннями Максвелла) і служить для передачі спрямованих електромагнітних хвиль розпочинаючи з метрового і закінчуючи сантиметровим діапазонами.

### Опис

Бокова поверхня каналу хвилевода є границя розділу двох середовищ, при переході через яку різко змінюються діелектрична проникність або магнітна проникність та електропровідність. Ця поверхня може мати довільну форму. На практиці використовуються циліндричні хвилеводи з різноманітними перерізами (прямокутні, круглі, Н- та П- подібні і т.і.).

До хвилеводів відносять, як правило тільки ті, що мають канал з одностов'язним перерізом, а інші (наприклад, коаксіальні кабелі) розглядаються в теорії довгих ліній.

## Властивості

Головна особливість хвильовода полягає в тому, що в ньому можуть розповсюджуватися електромагнітні хвилі, довжина яких менша чи співмірна із поперечним перерізом хвильовода. Це обумовлює використання хвильоводів в основному в області надвисоких частот (сантиметровий та дециметровий діапазони). За використанням поділяються на дві групи: фідери та лінії далекого зв'язку. Фідери служать для передачі енергії між блоками апаратури, що знаходяться на порівняно невеликій відстані, наприклад, антенно-фідерна система радіолокаційної станції чи мережевий кабель між ПК локальної мережі. Лінії далекого зв'язку служать для передачі даних на великі відстані. Лінія радіозв'язку використовує атмосферу.

## Технічні вимоги

- малий коефіцієнт загасання, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії (ККД) фідера;
- забезпечення заданої потужності, що передається, без електричних пробіїв і перегріву;
- економічна доцільність, обумовлена помірними поперечними розмірами, малою вагою, доступними матеріалами, простотою конструкції і технології виробництва та ін.

## Переваги

Основною перевагою металічних хвильоводів в порівнянні з двохранівідними лініями передачі та коаксильними кабелями є незначні втрати на НВЧ.

Причини цього:

- Майже повна відсутність втрат на випромінювання енергії в навколишнє середовище;
- При однакових розмірах хвильовода та, наприклад, двохранівідної лінії поверхня хвильовода, по якій течуть струми (скін ефект) завжди більша ніж у двохранівідної лінії. Із цього випливає, що густина поверхневих струмів, а отже і втрати на джоулеве тепло, будуть в хвильоводах менші.

## Недоліки

- Наявність нижньої границі для пропускних частот;

- Громіздкість конструкції на дециметрових та більш довгих хвилях;
- Необхідність більшої точності виготовлення та спеціальної обробки внутрішньої поверхні стінок хвилевода; \* Складність монтажу.

## **2.Коаксіальний кабель**

Коаксіальний кабель (менш поширена назва – коаксіал) – це електрокабель, основними компонентами якого є центральний провід та металеве обплетення, розділені внутрішньою ізоляцією та розміщені в єдиній оболонці. Застосовується передачі радіочастотних електросигналів. Телевізійний кабель максимально захищений від перешкод, а також передає сигнал на далекі відстані.

### **Сфера використання коаксіального кабелю**

Коаксіальний кабель – оптимальний варіант, якщо ставиться завдання передавати електросигнали з низькими втратами швидко та на значні відстані. Це сприяє широкій сфері використання даної кабельно-провідникової продукції. Сьогодні радіочастотний кабель застосовують не лише для створення комп'ютерних мереж типу Ethernet, але також для кабельного телебачення та широкодіапазонного телерадіомовлення. Крім того, виріб задіють в автоматичних системах контролю, науково-дослідних конструкціях, відеоспостереженні та сигналізації, радіоелектроніці, військовій та авіатехніці, і навіть у космічному обладнанні.

### **Групи коаксіальних кабелів для телебачення та радіотехніки**

Виходячи з хвильового опору, розрізняють кабелі:

- 50 Ом – частіше зустрічаються у радіоелектронній сфері, проте можуть використовуватися також для вирішення інших завдань. Особливість – передача радіосигналів із мінімальними втратами;
- 75 Ом – становить конкуренцію попередньому підвиду. Якщо стоїть питання про те, який телевізійний кабель який кращий, у проводу 75 Ом немає конкурентів. Використовується у галузях, де висока потужність – не мета, і необхідний великий метраж провідникової продукції;

- 100 Ом – зустрічається досить рідко, переважно, у техніці використовує імпульси;
- 150 Ом – досить рідко зустрічається у будь-якій із сфер. Не має аналогів і не використовується за кордоном;
- 200 Ом – не може скласти гідну конкуренцію проводам 50 та 75 Ом.

**Залежно від екранування, розрізняють дроти:**

- із заниженим екрануванням;
- з одношаровим обплетенням;
- з дво- або багатошаровим обплетенням;
- із звичайним екраном;
- з цілісним екраном.

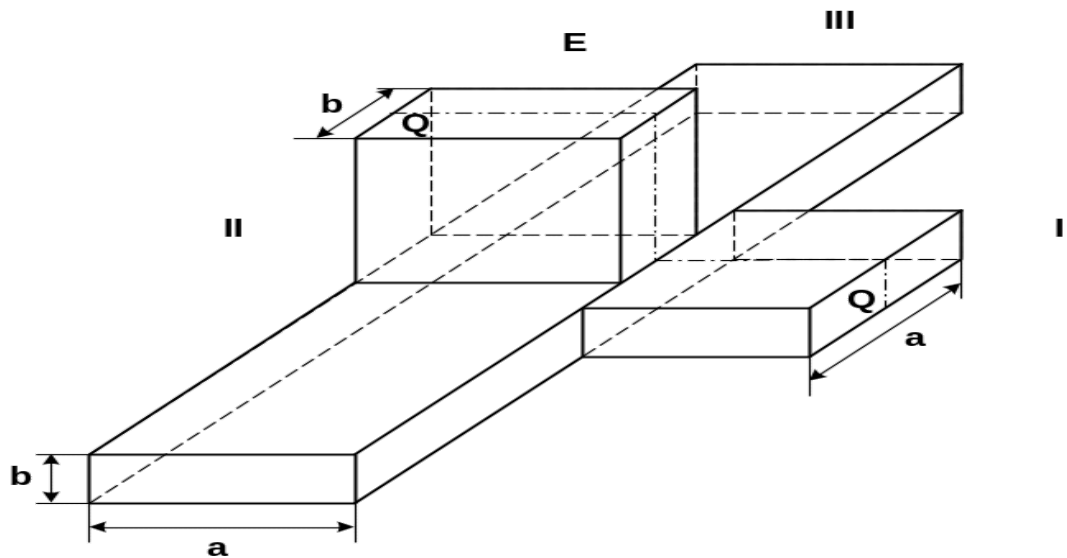
### **3. Подвійний хвилевода трійник,**

У техніці НВЧ широко застосовується подвійний хвилевода трійник, або Т-міст (рис. 4). Міст утворюється суміщення в єдиний симетричний простір Н- і Е-трійників. У Т-мості Е-трійник утворений плечима II, III, IV а Н-трійник – плечима I, III, IV.

Розглянемо роботу трійників за умови, що всі плечі узгоджені і розраховані на пропускання лише основної хвилі.

Розріз Е-трійника показано на рис. 5 Він являє собою розгалуження в площині Е основного хвилеводу III, VI.

Трійник конструктивно симетричний відносно площини Е. Тому при подачі потужності в Е-плече розподіл магнітного поля в плечах III, IV однаковий, а електричного – однаковий за амплітудою і протилежний за фазою. Отже, в бокових плечах трійника збуджуються хвилі, в яких амплітуди векторів Е і Н однакові магнітні поля синфазні, а електричні – протифазні. Тому в узгодженому трійнику потужність, подана в плече Е, в бокових плечах III і IV ділиться навпіл.



### Конструкція подвійного хвелеводного трійника

Н-трійник являє собою розгалуження в Н-площині основного хвелеводу III, IV. Оскільки трійник симетричний відносно площини Q, то при збудженні Н-плеча в площинах зв'язку 1-1 і 2-2 розподіл електричного поля однаковий за амплітудою і фазою, а магнітного – однаковий за амплітудою, але протифазний.

Тому в бокових плечах збуджуються однакові хвилі з синфазними електричними і протифазними магнітними полями.

Якщо в трійнику відсутні втрати, то потужність, подана в Н-плече, поділяється в бокових плечах навпіл. Для взаємного Н-трійника – навпаки: при подачі в плечі III і IV однакових хвиль з синфазними електричними полями вся потужність підсумовується в Н-плечі.

Розглянемо роботу Т-моста. Його основною властивістю є взаємна розв'язка між плечима I, II, III, IV.

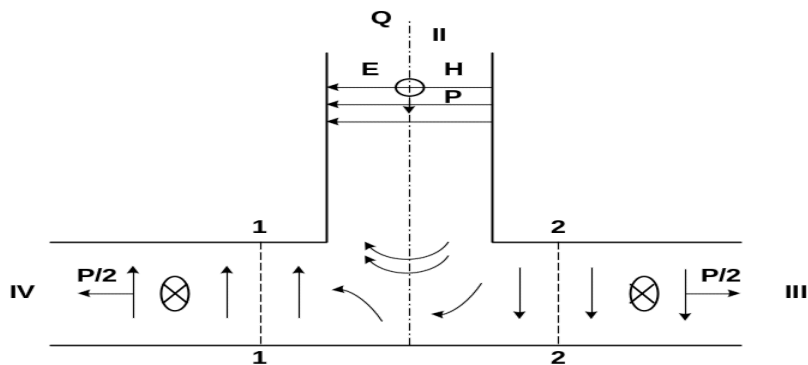


Рис. 5. Спрощена конструкція Е-трийника

За аналогічним принципом працює й узгоджений Н-трийник

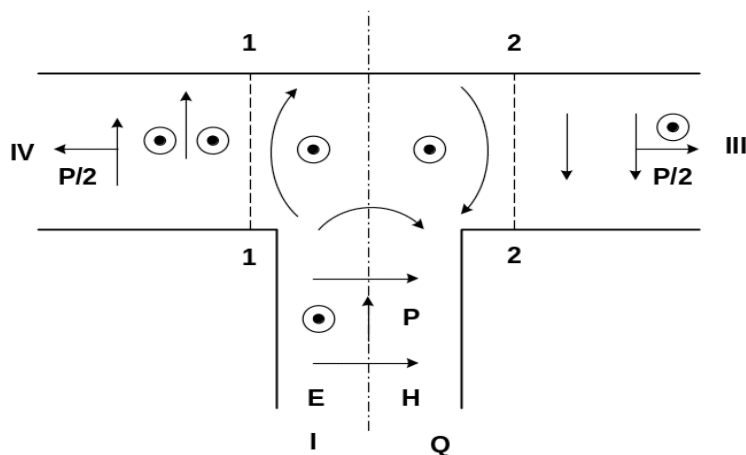


Рис. 6 Спрощена конструкція Н-трийника

Розв'язка між плечима I і II пояснюється так. При збудженні в плечі I хвилі  $H_{10}$  вектор  $E$  буде паралельним поздовжній осі плеча II. При такій орієнтації в Е-плечі можуть збуджуватись хвилі  $E$  або  $H$  вищих типів, які в плечі I не можуть поширюватись, тому що воно розраховано на пропускання хвилі  $H_{10}$

При збудженні хвилі  $H_{10}$  в плечі II вектор  $E$  паралельний широким стінкам хвилеводу плеча 1, і тому збудження хвилі  $H_{10}$  у цьому плечі неможливе. Плечі III і IV також розв'язані за умови ввімкнення узгоджених навантажень в Е- і Н-плечах моста. Справедливість даного твердження можна пояснити таким чином. Припустимо, що живиться плече III, а в плечі IV потужність відсутня. Нехай в плечі III амплітуда електричного поля дорівнює  $2A$ . Тоді можна вважати, що в плечі III існують дві синфазні хвилі з амплітудами  $A$ , а відсутність потужності в плечі IV еквівалентна наявності в ньому двох однакових за амплітудою і протилежних за фазою хвиль, тобто хвиль з амплітудами  $\pm A$ . Відповідно до викладеного вище пара хвиль з однаковими

фазами з плечей III і IV надходить в Н-плече, а пара хвиль з протилежними фазами – в Е-плече.

Таким чином, подвійний трійник працює як міст: при подачі потужності в Н(Е)-плече потужність надходить у бокові плечі і не проходить в Е(Н) – плече.

Для забезпечення нормальної роботи Т-моста необхідно його узгоджувати. З цією метою в Н- і Е-плечі вводять різноманітні узгоджувальні елементи – штирі, діафрагми і т.ін. Такий узгоджений міст часто застосовується в різних пристроях НВЧ. Його характеристики при повній конструктивній симетрії зберігаються в широкому діапазоні частот, точніше – у смузі узгодження Н- і Е-плечей.

## **Лекція 18.**

**Тема: Нелінійні електричні кола. Поняття нелінійних електричних кіл змінного струму. Кола, що диференціює та інтегруючі кола несинусоїдального струму.**

**Мета:** Вивчити загальні відомості про нелінійні електричні ланцюги

**Запитання лекції:**

1. Поняття нелінійних електричних кіл
2. Інтегруюче RC- коло.
3. Диференціююче RC-коло утворюється

### **1. Поняття нелінійних електричних кіл**

Всі електричні і магнітні кола є не-лінійними, лінійними їх можна вважати в обмежених границях зміни струмів і напруг.

Але якщо в деяких (робочих) межах зміни струмів і напруг вольтамперна характеристика (ВАХ) елемента є прямою лінією, елементи вважаються лінійними.

Якщо у робочих межах зміни струмів і напруг ВАХ елемента  $u = f(i)$ ,  $i = f(u)$  не є прямою лінією, елементи вважаються нелінійними.

Отже, нелінійним електричним вважається коло, в яке ввімкнений принаймні один нелінійний елемент. Нелінійним називається такий елемент, який має нелінійну ВАХ. Опір таких елементів залежить від струму, який в них протікає.

Необхідно розпізнавати найхарактерніші випадки нелінійності: безперервні і переривчасті (уривчасті), монотонні та немонотонні, одно- й неоднозначні, симетричні та несиметричні.

Прикладом нелінійності з монотонною безперервною ВАХ є елементи з металевими нитками (нагрівальний пристрій, лампи розжарювання), які нагріваються до порівняно високої температури (рис.1), а також електровакуумні пристрої, які базуються на принципі газового розряду, або термоелектронної емісії (рис.2).

Переривчасті характеристики (наприклад, стрибкоподібні) мають реле (релейна характеристика (рис.3)). Діоди – прилади односторонньої провідності (їх ВАХ зображена на рис.9.4).

Причиною неоднозначності ВАХ може бути, наприклад, наявність в електричному колі елементів, пов'язаних з магнітним полем (рис.5).

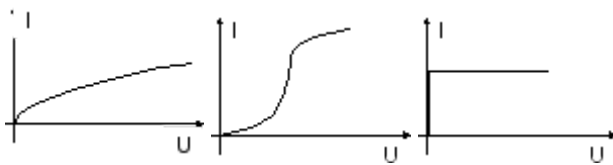


Рис.1, Рис.2, Рис.3.

У симетричних нелінійних елементах ВАХ не залежать від напрямку струму і полярності напруги. До них належать електричні лампи розжарювання, батареї, терморезистори та ін. (рис.6).

У несиметричних нелінійних елементах ВАХ залежить від напрямку струму і полярності напруги: дуга з різнорідними електродами, діоди (вентильні) та ін. (див.рис.9.4).

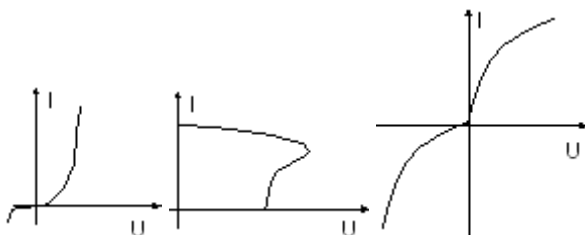


Рис.4 Рис.5 Рис.6

Фізичні причини нелінійності ВАХ можуть бути різними. Наприклад, у термісторах і лампах розжарення – збільшення опору при нагріванні, напівпровідникових тріодах – зміна властивостей  $P - n - P$  переходів.

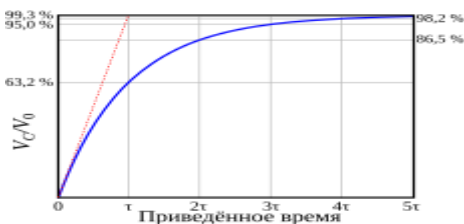
У теорії електричних і магнітних кіл фізичними причинами нелінійності характеристики цікавляться мало. Головне для розрахунків – вигляд ВАХ, яка має бути задана графічно або аналітично.

Закони Ома, Кірхгофа, Джоуля – Ленца є універсальними і повністю можуть застосовуватися для розрахунку нелінійних електричних кіл. Але аналітичні методи їх розрахунку дуже часто утруднені через складну залежність струму від напруги, а отже, і складність математичного виразу для ВАХ. У багатьох випадках одержання такого виразу пов'язано з громіздкими розрахунками, обсяг яких перевищує обсяг розв'язування самої задачі. У зв'язку з цим аналіз нелінійних електричних і магнітних кіл аналітичними методами застосовується дуже рідко.

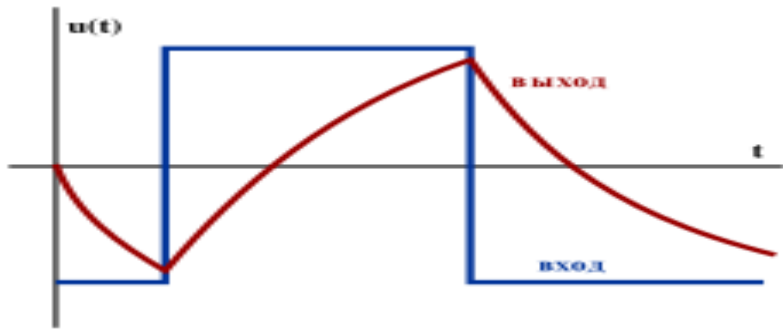
Найчастіше для таких розрахунків застосовується графоаналітичні методи, в основу яких покладені закони Ома і Кірхгофа.

## 2.Интегрирующее RC- коло.

Реакція інтегруючого кола на одиничний ступінчастий вплив ампліту

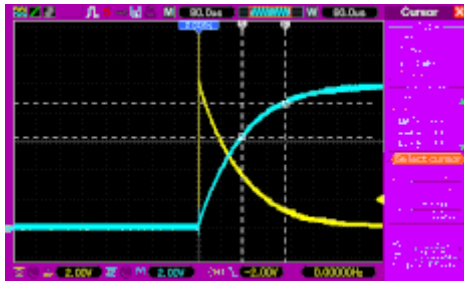


$\tau$  - постійна часу кола;



напруга на конденсаторі.

Реакція інтегруючого кола на прямокутний імпульс



Осциллограммы, снятые с последовательной RC

цепи.

R — 1500 Ом — желтый

C — 100 нФ — синий

$\tau = 150$  мкс.

Якщо вхідний сигнал подається до а вихідний знімається з (див. малюнок), то таке кола називається колом інтегруючого типу.

Реакція кола інтегруючого типу на одиничний ступінчастий вплив з

амплітудою визначається наступною формулою

$$V_c(t) = V_0 \left(1 - e^{-t/RC}\right).$$

Таким чином, постійна часу цього аперіодичного процесу дорівнюватиме:

$$\tau = RC$$

Інтегруючі кола пропускають постійну складову сигналу, блокуючи високі частоти, тобто фільтрами нижніх частот (ФНЧ). При цьому чим більша постійна часу, тим нижча частота зрізу ФНЧ. Ця властивість використовується у вторинних джерелах живлення, в яких необхідно відфільтрувати змінну складову пульсуючої напруги після випрямляча напруги.

Інтегруючими властивостями володіє кабель з пари проводів, якщо хвильовий опір кабелю набагато менше внутрішнього опору джерела сигналу (неузгоджене навантаження), оскільки будь-який провід має активний опір, а пара проводів, що йдуть поруч, ще й утворюють конденсатор. При проходженні сигналів таким кабелем, їх високочастотна складова може губитися, причому тим сильніше, чим більше довжина кабелю.

### **3.Диференціююче RC-коло**

Диференціююче RC-коло утворюється, якщо поміняти місцями резистор  $R$  і конденсатор в інтегруючій ланцюга. При цьому вхідний сигнал подається на конденсатор, а вихідний сигнал знімається з резистора. Для постійної напруги конденсатор є розривом ланцюга, тобто постійна складова сигналу в ланцюгу диференціюючого типу буде блокована. Такі кола є фільтрами верхніх частот. Їх частота зрізу у яких визначається тією ж постійною часу. Чим більше, тим нижче частота, яка може бути без суттєвого послаблення пропущена через ланцюг.

Диференціюючі ланцюги мають ще одну особливість. На виході такого ланцюга один сигнал перетворюється на два послідовні стрибки напруги вгору і вниз щодо базового рівня з амплітудою, що дорівнює вхідному напрузі, якщо постійна часу ланцюга мала. Базовий рівень задається або позитивним висновком джерела живлення, або "землею", залежно від того, куди підключений резистор. Коли резистор підключений до джерела, амплітуда позитивного вихідного імпульсу буде вдвічі вищою за напругу живлення. Цим користуються для множення напруги, а також у разі підключення резистора до «землі» для формування двополярної напруги з наявного однополярного живлення.

## **Лекція 19**

**Тема: Нелінійні електричні кола. Кола послідовного та паралельного обмеження сигналів.**

**Мета:** Вивчити призначення та схеми амплітудних обмежувачів.

**Запитання лекції:**

1. Загальні відомості за обмежувач амплітуди сигналів.
2. Односторонній амплітудний діодний обмежувач.
3. Двосторонній амплітудний обмежувач.

### **1. Загальні відомості за обмежувач амплітуди сигналів**

Обмежувачем амплітуди сигналів або просто обмежувачем називається пристрій, за допомогою якого обмежується амплітуда вихідної напруги за умови, що вхідна напруга перевищує певну межу, яка називається порогом обмеження.

При цьому форма вихідної напруги до настання порога обмеження повинна зберігати форму вхідної напруги. Цим умовам відповідає амплітудна характеристика, тобто залежність, що має форму ламаної лінії.

Обмеження буває одностороннє та двостороннє.

У свою чергу розрізняють одностороннє обмеження знизу і одностороннє обмеження зверху.

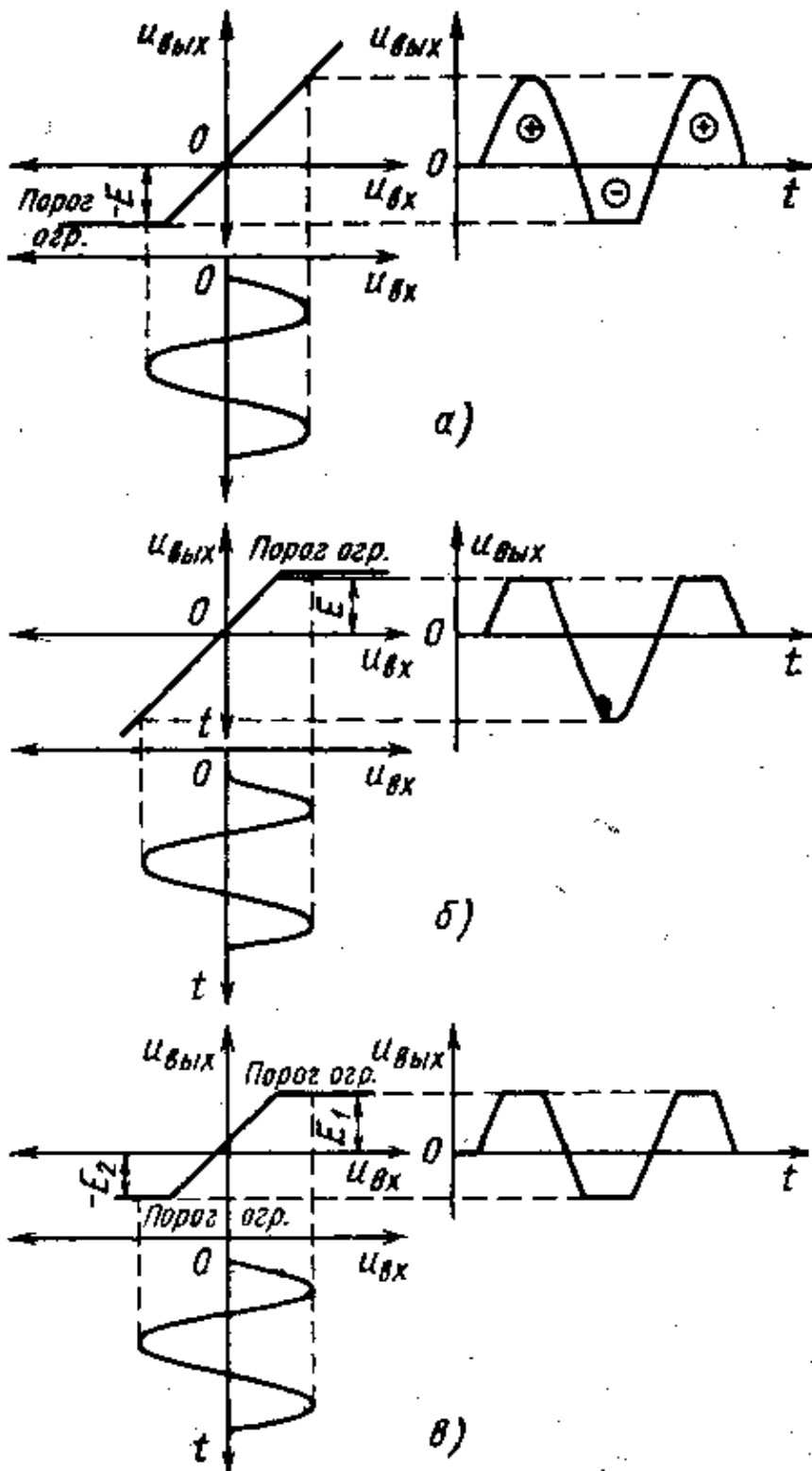


Рисунок 1

Подібні амплітудні характеристики можуть бути отримані за допомогою нелінійних елементів, тобто напівпровідникових приладів та електронних ламп.

Найбільшого поширення в обмежувачах набули напівпровідникові діоди.

Розрізняють дві категорії схем діодних обмежувачів: послідовні та паралельні. У послідовних схемах обмежує діод та навантаження  $R$  з'єднані між собою послідовно.

У паралельних схемах ці елементи з'єднуються паралельно.

## 2.Односторонний амплитудний діодний обмежувач

Односторонний амплитудний обмежуватель - це пристрій, напруга на виході якого  $U_{\text{вих}}(t)$  залишається на постійному рівні  $U_{\text{огр}}$ , коли вхідна напруга  $U_{\text{вх}}(t)$  або перевищує деяке граничне значення  $U_{\text{пор}}$  (обмеження зверху), або нижче порогового значення (обмеження знизу).

Інакше вихідна напруга повторює форму вхідної.

Діодні обмежувачі бувають послідовні та паралельні.

У послідовних обмежувачах діод включений послідовно з навантаженням, а паралельних – паралельно навантаженню.

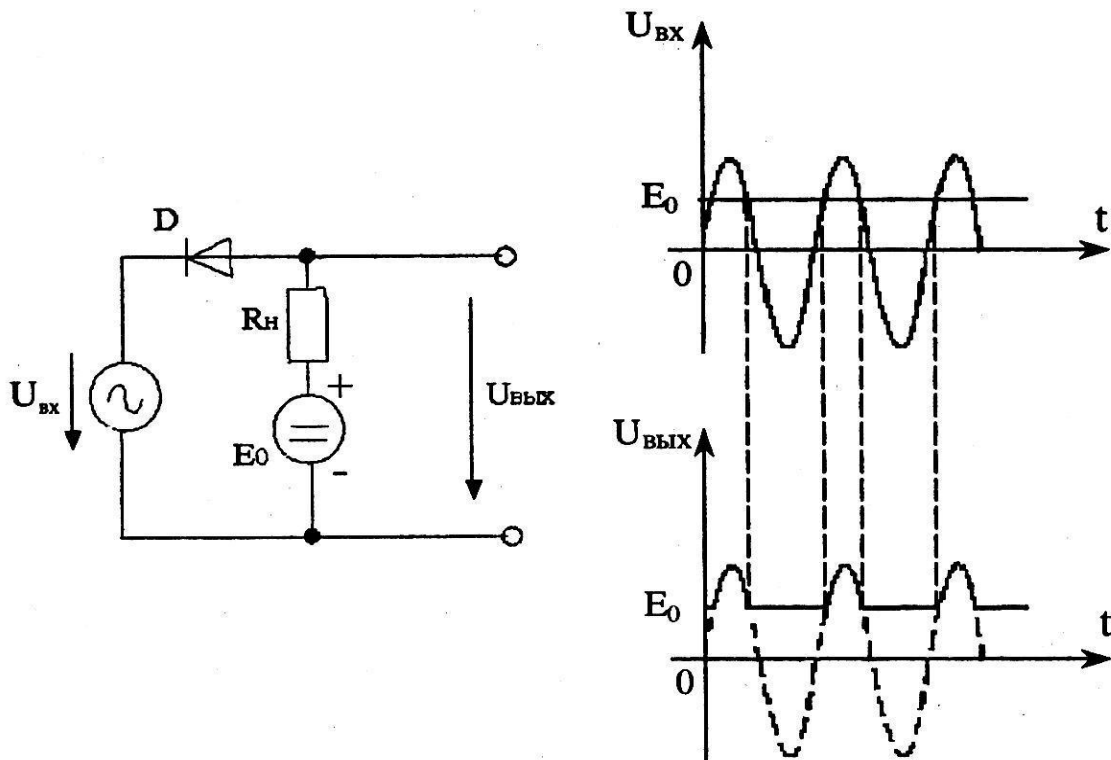


Рисунок 2. Послідовний діодний обмежувач

Обмежувач - це пристрій, напруга на виході якого  $U_{\text{вих}}(t)$  залишається на постійному рівні  $U_{\text{огр}}$ , коли вхідна напруга  $U_{\text{вх}}(t)$  або перевищує деяке

граничне значення  $U_{пор}$  (обмеження зверху), або нижче за порогове значення (обмеження знизу).

Інакше вихідна напруга повторює форму вхідної.

Діодні обмежувачі бувають послідовні та паралельні.

У послідовних обмежувачах діод включень послідовно з навантаженням, а паралельних – паралельно навантаженню

Розглянемо ідеалізовану схему послідовного діодного обмежувача. Доки вхідна напруга менше  $E_0$ , діод закритий і  $U_{вих}$  дорівнює  $E_0$ .

У проміжках часу, коли вхідна напруга перевищує  $E_0$ , діод відкритий і  $U_{вих}$  повторює  $U_{вх}$ . Таким чином, розглянутий обмежувач є послідовним діодним обмежувачем на позитивному рівні знизу. Практически используемая схема рассмотренного ограничителя приведена на рис. 3.2. Она позволяет регулировать уровень ограничения, сделав одно из резисторов  $R_1$  или  $R_2$  переменным.

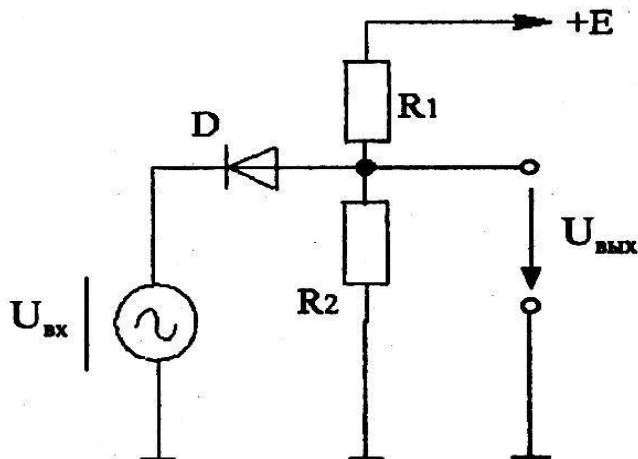


Рисунок 3. Реальна схема послідовного діодного обмежувача

### 3. Двосторонній амплітудний обмежувач

Двосторонні обмежувачі обмежують сигнал на двох рівнях.

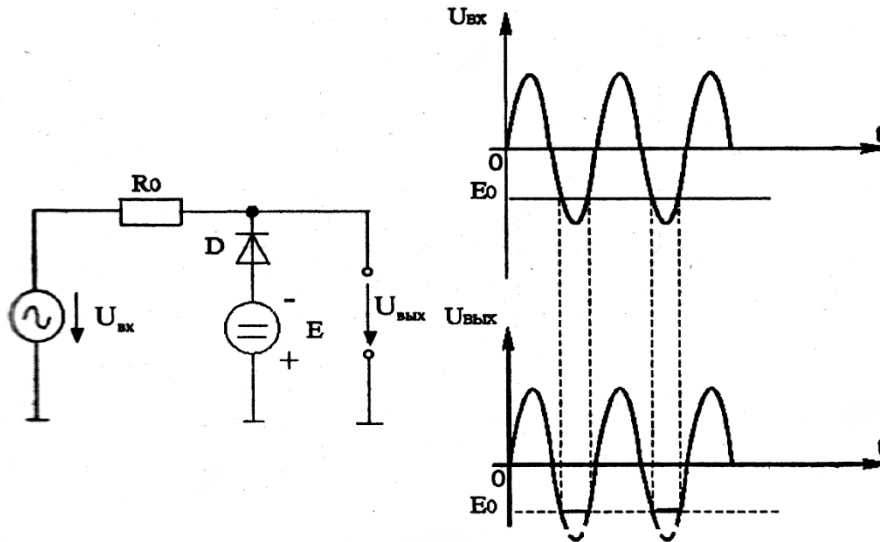
Найбільш простими є обмежувачі на діодах (діодні обмежувачі).

Розглянемо принцип дії паралельного діодного обмежувача.

Лише у проміжках часу, коли вхідна напруга негативніше, ніж  $E_0$ , діод відкритий і  $U_{\text{вих}}$  одно  $E$ .

У всі інші моменти часу діод закритий і  $U_{\text{вих}}$  повторює  $U_{\text{вх}}$ .

Таким чином, даний обмежувач є паралельним обмежувачем діодів на негативному рівні знизу.



. Рисунок 4. Паралельний діодний обмежувач Широке поширення знайшли обмежувачі амплітуди, побудовані з урахуванням ОУ. На рис. 3.4 а наведена схема одностороннього обмежувача на основі ОУ, на рис. 3.4,б – передавальна характеристика обмежувача, але в рис. 3.4,в - тимчасові діаграми його роботи.

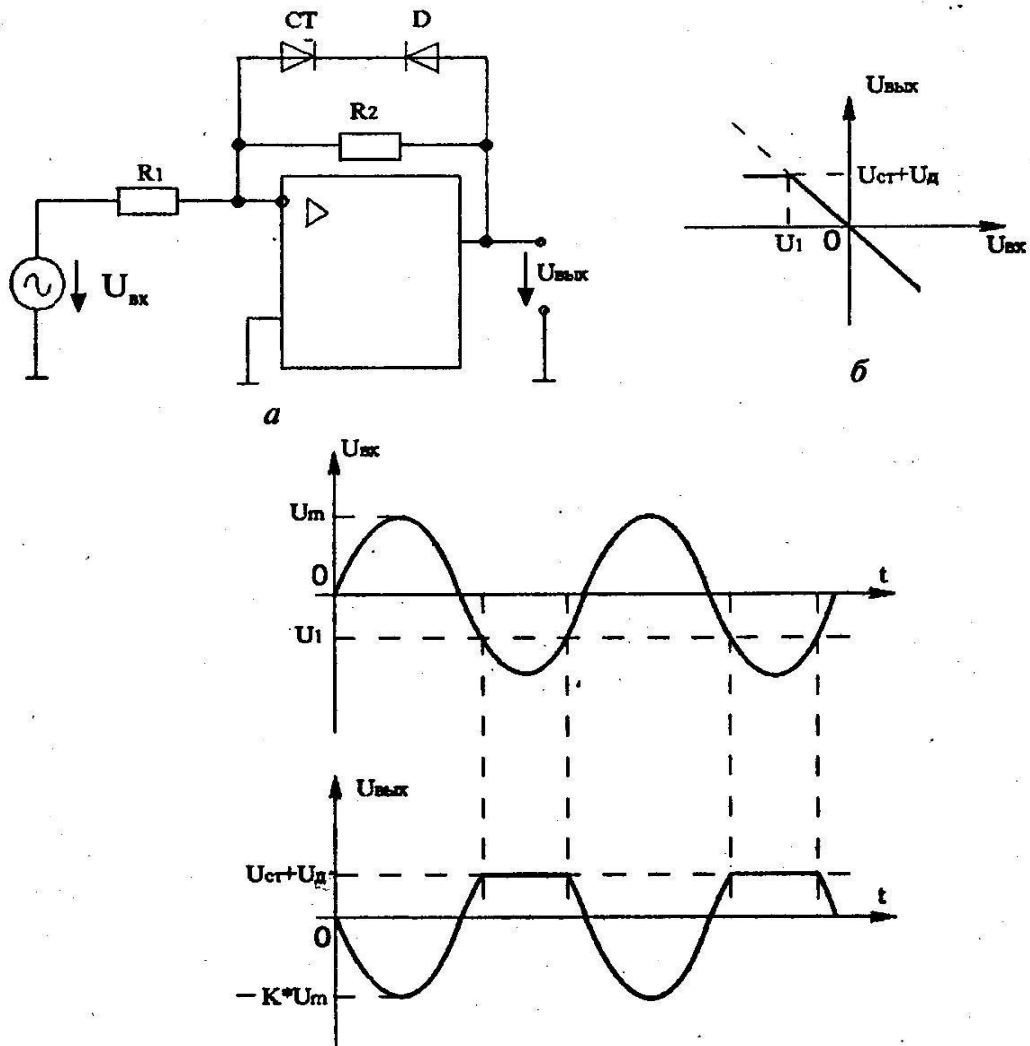


Рисунок 5. У проміжках часу, коли напруга  $U_{вх}$  негативна або менша, ніж  $U_{ст} + U_d$ , діод закритий і пристрій працює як звичайний підсилювач, що інвертує ( $U_{ст}$  – напруга стабілізації стабілітрона,  $U_d$  – пряме падіння напруги на діоді).

У проміжках часу, коли напруга  $U_{вх}$  вище за рівень  $U_{ст} + U_d$ , діод закритий, а стабілітрон знаходиться в режимі стабілізації і напруга  $U_{вх}$  обмежується на рівні  $U_{ст} + U_d$ .

Вхідна напруга  $U_1$ , при якій починається обмеження вихідного, визначається виразом  $K = R_2/R_1$ .

## Лекция 20

**Тема: Перехідний процес. Поняття перехідного процесу в електричному колі. Перший та другий закони комутації.**

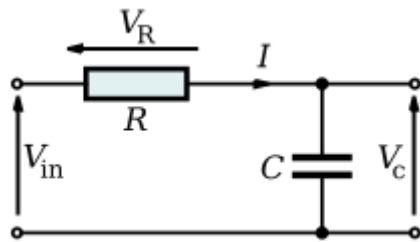
**Мета:** Вивчити причину виникнення та хід перехідного процесу в електричному ланцюзі

**Запитання лекції:**

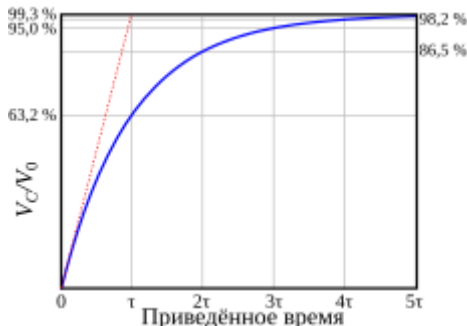
1. Перехідні процеси в електричних колах.
2. Характеристики перехідного процесу.
3. Закони (правила) комутації.

### **1.Перехідні процеси в електричних колах**

**Перехідні процеси** — процеси, що виникають в електричних ланцюгах за різних впливів, що переводять їх зі стаціонарного стану в новий стаціонарний стан, тобто, — при дії різного роду комутаційної апаратури, наприклад, ключів, перемикачів для увімкнення або вимкнення джерела або приймача енергії, при обривах у колі, за коротких замикань окремих ділянок кола тощо.



RC-ланцюг інтегровального типу



Напруга на конденсаторі в інтегровальному RC-ланцюзі при подачі східчастого збурення (функція Гевісайда) за нульового початкового заряду на конденсаторі

Наприклад, при підключенні розрядженого конденсатора до джерела

напруги через резистор напруга на конденсаторі змінюється від 0 до за законом:

$$U_c(t) = U_0(1 - e^{-t/\tau}),$$

де  $T$  — стала часу.

Фізична причина виникнення перехідних процесів у ланцюгах — наявність у них котушок індуктивності та конденсаторів, тобто індуктивних та ємнісних елементів у відповідних схемах заміщення. Пояснюється це тим, що під час комутації (процес замикання або розмикання вимикачів) у колі енергія магнітного та електричного полів цих елементів не може змінюватися стрибком. Іншими словами, конденсатор не може запастися енергією миттєво, а якби міг, то для цього знадобилося б джерело енергії нескінченної потужності.

Стандартні і диференціальним рівнянням :

- неоднорідним (однорідним), якщо схема заміщення ланцюга містить (не містить) джерела ЕРС та струму;

- лінійним (нелінійним) для лінійного (нелінійного) ланцюга.

## **2. Характеристики перехідного процесу**

Найважливіші характеристики перехідних процесів перехідної функції (реакції системи на одиничне збурення)

### **Перерегулювання**

Показує максимальне відхилення вихідного сигналу системи по амплітуді по відношенню до сталого значення. Чим більше перерегулювання, тим більше система схильна до коливань.

### **Ступінь затухань перехідного процесу**

Ступінь затухань перехідного процесу - відношення амплітуд двох перерегулювань (послідовних коливань одного знаку). Чисельником є амплітуда першого коливання. Ступінь затухань показує у скільки разів зменшується амплітуда другого коливання порівняно з першим.

### **Логарифмічний декремент коливання**

Логарифмічний декремент коливання - натуральний логарифм відношення амплітуд двох сусідніх перерегулювань. Зворотна йому величина показує, за яке число коливань їх амплітуда зменшується в  $e$  - раз ( $e$  - основа натуральних логарифмів).

### **Час перехідного процесу**

Час, необхідний вихідному сигналу системи для того, щоб наблизитися до свого сталого значення. Зазвичай межа такого наближення становить 1-10% від кінцевого значення.

### **Колівальність**

Характеризує схильність системи до коливань і визначається як модуль відношення амплітуди другого коливання до амплітуди першого коливання помножене на 100%.

### **Встановлена помилка**

Встановлена помилка системи - різниця між передбачуваним і реальним значенням вихідного сигналу при часі, що прагне до нескінченності. В ідеальних астатичних системах встановлена помилка дорівнює нуль.

Час встановлення у новий стаціонарний стан.

Перехідні процеси можуть тривати від часток наносекунд до кількох років. Тривалість залежить від конкретного ланцюга. Наприклад, стала часу саморозряду конденсатора з полімерним діелектриком може досягати тисячоліття. Тривалість перебігу перехідного процесу визначає *стала часу* ланцюга.

еалізовані впливи під час аналізу відгуку математичної моделі кола — це східчаста функція Гевісайда та імпульсна функція Дірака.

Математично перехідний процес у колі описується

### 3.Закони (правила) комутації

Перший закон комутації Струм, що тече через індуктивний елемент

безпосередньо до комутації дорівнює струму, що тече під час комутації, і струму через цей

$$i_L(0_-) = i_L(0) = i_L(0_+).$$

індуктивний елемент безпосередньо після комутації оскільки струм у котушці миттєво змінитися не може:

Другий закон комутації Напруга на ємнісному елементі безпосередньо до комутації дорівнює напрузі під час комутації, і напрузі на ємнісному елементі безпосередньо після комутації оскільки неможливий стрибок напруги на конденсаторі:

$$u_C(0_-) = u_C(0) = u_C(0_+).$$

При цьому струм у конденсаторі може змінюватися стрибкоподібно.

## Лекція 21

**Тема: Перехідний процес в колах першого порядку Перехідний процес в електричному LR- колі**

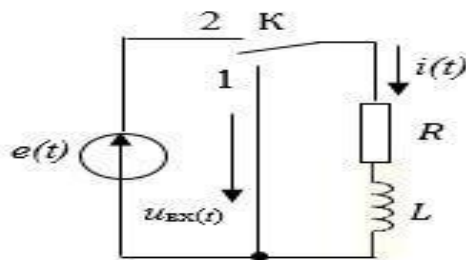
**Мета:** розгляньте криві зміни напруги та струму при підключенні джерела при короткому замиканні

**Запитання лекції:**

1.Перехідні процеси в RL-колі при підключенні джерела та при короткому замиканні

### 1.Перехідні процеси в RL-колі при підключенні джерела та при короткому замиканні

Схема, що ілюструє умови виникнення перехідного процесу при впливі стрибка напруги на вході RL ланцюга показана на рис 1. Як і попередньому



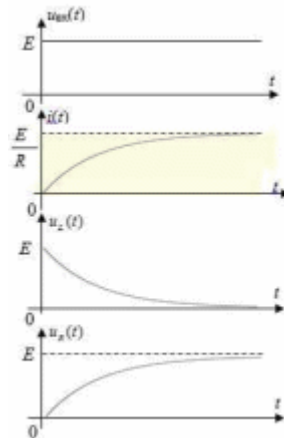
випадку — стала величина при

Рисунок 1. Перехідний процес у RL-ланцюзі

У вихідному стані послідовний ланцюжок RL підключений до контакту «1» (закорочений) і, отже, початкового запасу енергії в котушці індуктивності немає. При підключенні до джерела ЕРС (контакт «2») у ланцюзі RL потече струм, який можна знайти з рівняння Кірхгофа або, у вигляді диференціального рівняння, яке перетворюється на вид. Рішення цього рівняння - струм, що шукається, як сума вільної і вимушеної складових. Вимушена складова дорівнює струму в режимі, що встановився. Оскільки опір котушки індуктивності постійному струму дорівнює нулю, то вимушена складова струму дорівнює . Вільна складова визначається з диференціального рівняння при .

Розв'язок характеристичного рівняння. Постійну інтегрування  $A$  можна знайти з рівняння струму, враховуючи початкові умови. Відповідно до закону комутації котушки індуктивності, у ній неспроможна стрибком змінитися струм  $i$ , отже, при струм  $i$  рівняння струму матиме вигляд: , звідки  $i$ , де — постійна часу RL-ланцюга.

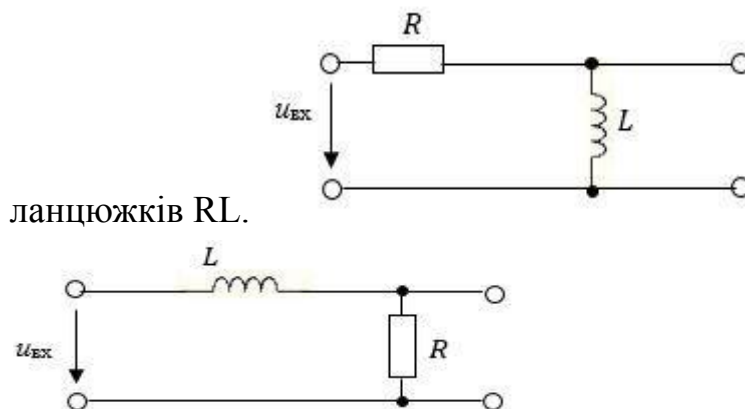
Тимчасові діаграми струму та напруги на елементах наведені на рис. 2. Як і в розглянутому вище ланцюга RC, вони носять експоненційний характер, але в котушці індуктивності струм зростає, а напруга на ній падає, прагнучи до



нуля в режимі, що встановився.

Рисунок 2. Тимчасові діаграми перехідного процесу в RL-ланцюзі

Нижче наведені схеми диференціюючої (рис.а) та інтегруючої (рис.б)



а) б)

Рисунок 3 Дифференцирующая (а) и интегрирующая (б) RL-це

## Лекція 22

**Тема: Перехідний процес в колах першого порядку Перехідний процес в електричному RC - колі**

**Мета:** розгляньте криві зміни напруги та струму при підключенні джерела та при короткому замиканні

**Запитання лекції:**

1. Перехідні процеси в RL-колі при підключенні джерела та при короткому замиканні

### 1. Перехідні процеси в RC-колі при підключенні джерела та при короткому замиканні

Процеси, що протікають у найпростішому RC-ланцюзі.

Перехідний процес обумовлений тим, що енергія електромагнітних полів, пов'язаних з ланцюгом при різних режимах, що встановилися, різна, а стрибкоподібна зміна енергії, тобто. зміна енергії на кінцеву величину за нескінченно малий проміжок часу неможлива через обмеженість величини потужності фізично існуючих джерел енергії.

Лінійним пристроєм (елементом) називається пристрій (елемент), параметри якого не залежать від струму, що протікає, або прикладеної *напруги*.

Нелінійний пристрій - це пристрій, параметри якого залежить від струму чи напруги.

Перехідні процеси у найпростіших лінійних ланцюгах, тобто. у ланцюгах RL або RC описуються диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\tau \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = y(t),$$

де  $x(t)$  - напруга чи струм у схемі,  $y(t)$  - зовнішнє вплив. Розв'язання цього рівняння для випадку  $y(t) = \text{const}$  має вигляд: , де  $t$  – поточний час,  $x(t)$  – напруга або струм у схемі,  $x(\infty)$  – кінцеве значення  $x(t)$  при  $t \rightarrow \infty$ ,  $x(0)$  – початкове значення  $x(t)$  при  $t = 0$ . Характер зміни функції  $x(t)$  представлений рис. 1 (убуття або наростаюча експонента).

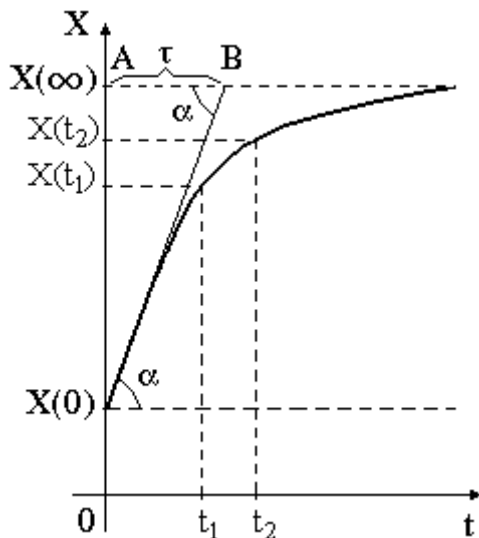


Рисунок. 1. Характер изменения экспоненциальной функции.

Выполним следующие преобразования:

$$x'(t) = \frac{x(\infty) - x(0)}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$x'(0) = \frac{x(\infty) - x(0)}{\tau}.$$

Поскольку  $x'(0) = \operatorname{tg} \alpha = \frac{x(\infty) - x(0)}{\tau}$ , то очевидно, что  $AB = \tau$ .

При анализе переходных процессов часто возникает задача нахождения интервала времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ , за который функция  $x(t)$  изменяется от значения  $x(t_1)$  до значения  $x(t_2)$ . Запишем значение функции в точках  $t_1$  и  $t_2$ :

$$x(t_1) = x(\infty) - [x(\infty) - x(0)] e^{-\frac{t_1}{\tau}},$$

$$x(t_2) = x(\infty) - [x(\infty) - x(0)] e^{-\frac{t_2}{\tau}}.$$

Откуда

$$e^{-\frac{t_1}{\tau}} = \frac{x(\infty) - x(t_1)}{x(\infty) - x(0)},$$

$$e^{-\frac{t_2}{\tau}} = \frac{x(\infty) - x(t_2)}{x(\infty) - x(0)},$$

$$t_1 = \tau \ln \frac{x(\infty) - x(0)}{x(\infty) - x(t_1)},$$

$$t_2 = \tau \ln \frac{x(\infty) - x(0)}{x(\infty) - x(t_2)},$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \tau \left( \ln \frac{x(\infty) - x(0)}{x(\infty) - x(t_2)} - \ln \frac{x(\infty) - x(0)}{x(\infty) - x(t_1)} \right) = \tau \ln \frac{x(\infty) - x(t_1)}{x(\infty) - x(t_2)}.$$

Застосуємо отримані співвідношення для аналізу RC-ланцюгів. Попередньо нагадаємо закони комутації для RL та RC-ланцюгів:

Перший закон комутації: напруга на конденсаторі в останній момент комутації неспроможна змінитися стрибком  $U_C(0-) = U_C(0+)$ ;

Другий закон комутації: струм, що протікає через індуктивність, не може змінитися стрибком  $I_L(0-) = I_L(0+)$ .

Закони комутації є наслідком те, що енергія в ланцюзі неспроможна змінюватися миттєво, оскільки цього потрібно нескінченно велика потужність джерел енергії. Розглянемо RC-ланцюг (рис.2).

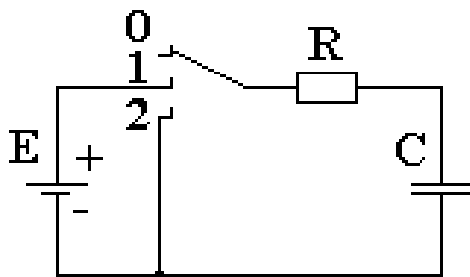


Рисунок 2. Схема RC-кола

Закони комутації є наслідком те, що енергія в ланцюзі неспроможна змінюватися миттєво, оскільки цього потрібно нескінченно велика

потужність джерел енергії. Розглянемо RC-коло (рис. 3).

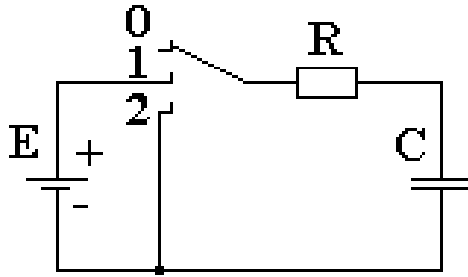


Рисунок 3. Схема простейшей RC-цепи.

Пусть конденсатор не заряжен и в момент времени  $t = 0$  ключ переходит из положения «0» в положение «1». Для начальных и установившихся режимов в этом случае можно записать:

$$\text{при } t = 0 \quad U_C(0) = 0, \quad U_R(0) = E;$$

$$\text{при } t = \infty \quad U_C(\infty) = E, \quad U_R(\infty) = 0.$$

После подстановки получаем:

$$U_C(t) = U_C(\infty) - [U_C(\infty) - U_C(0)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = E - (E - 0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

$$U_R(t) = U_R(\infty) - [U_R(\infty) - U_R(0)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 0 - [0 - E] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

.Вважаючи, що конденсатор заряджений до значення  $U_C = E$ , розглянемо процес після переключу ключа із положення «1» у положення «2». Початкові значення напруг на елементах, що встановилися, в цьому випадку запишуться: при  $t = 0 \quad U_C(0) = E, \quad U_R(0) = -E$ ;

$$\text{при } t = \infty \quad U_C(\infty) = 0, \quad U_R(\infty) = 0.$$

После подстановки получаем:

$$U_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$U_R(t) = -E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Характер изменения функций  $U_C(t)$  и  $U_R(t)$  представлен на рис. 4

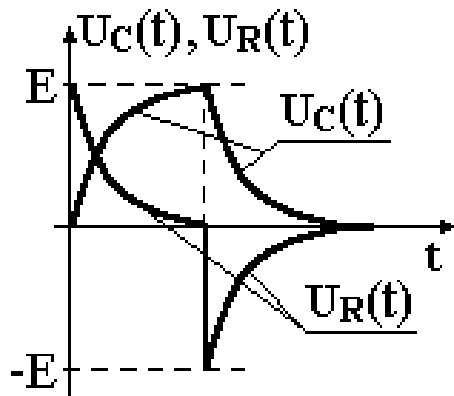


Рисунок 4. Характер зміни функцій  $U_C(t)$  та  $U_R(t)$  найпростішого RC-ланцюга.

З курсу математики відомо, що з потрібне значення постійної часу, тобто. за час  $3t$ , експонента змінюється на 0.95 своєї кінцевої повної зміни. Це означає, що за час  $3t$  конденсатор умовно розряджається та заряджається.

## Лекція 23

### Тема: Загальні відомості про сигнали. Електричні сигнали. Характеристика безперервного гармонійного сигналу.

**Мета:** Вивчити типи електричних сигналів та властивості синусоїдального безперервного сигналу.

#### Запитання лекції:

- 1.Електричні сигнали та їх класифікація
- 2.Характеристика безперервного гармонійного сигналу

#### 1.Електричні сигнали та їх класифікація

Відповідно до прийнятої традицією сигналом називають процес зміни у часі фізичного стану будь-якого об'єкта, що служить для відображення, реєстрації та передачі повідомлень. Насправді повідомлення нерозривно пов'язані з укладеною у яких інформацією. Коло питань, що базуються на поняттях «повідомлення» та «інформація», є об'єктом вивчення в дисципліні «Теорія інформації» та виходить за межі дисципліни «Електротехніка та електроніка». Тому далі не викладатиметься зв'язок, який існує меду фізичним виглядом сигналу і змістом укладеного в ньому повідомлення.

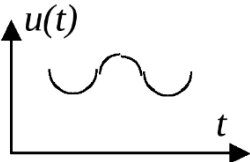
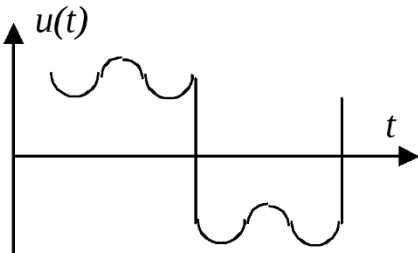
Для того, щоб зробити сигнали об'єктами теоретичного вивчення та розрахунків, слід зазначити спосіб їхнього математичного опису або, іншими словами, створити математичну модель сигналу. Математичною моделлю сигналу може бути, наприклад, функціональна залежність, аргументом якої є час. Математичні моделі електричних сигналів, що розглядаються в електротехніці та електроніці, зазвичай позначаються символами латинського алфавіту, і т.д. Знаючи математичні моделі сигналів, можна порівнювати ці сигнали між собою, встановлювати їх тотожність та відмінність, проводити класифікацію.

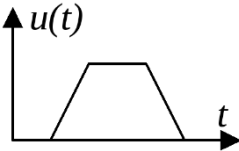
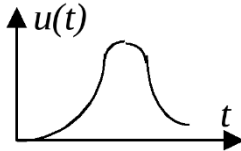
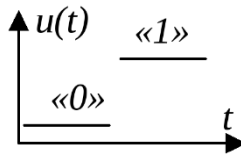
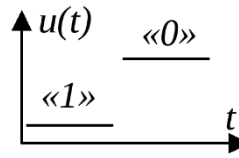
Класифікуючи сигнали на вигляд моделює їх функції часу, можна назвати аналогові і дискретні сигнали (табл.1).

Якщо сигнал має математичну модель виду безперервної або шматково-безперервної функції, він називається аналоговим.

Якщо значення сигналу визначені в усі моменти часу, а лише у лічильному безлічі точок, такий сигнал називається дискретним.

Дискретні сигнали у свою чергу поділяються на імпульсні та цифрові. Якщо сигнал як зміни струму чи напруги існує лише межах кінцевого інтервалу часу, такий сигнал називається імпульсним. Особливим різновидом дискретних сигналів є цифрові сигнали. Їх характерно те, що відлікові значення зіставлені числам. З міркувань зручностей технічної реалізації та обробки зазвичай використовується двійкова система числення.

| Таблица 1. Типы сигналов                                                            |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Аналоговые                                                                          |                                                                                      |
| непрерывные                                                                         | кусочно-непрерывные                                                                  |
|  |  |

| Дискретные                                                                        |                                                                                   |                                                                                                            |                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| импульсные                                                                        |                                                                                   | цифровые                                                                                                   |                                                                                                             |
|  |  | положительная логика<br> | отрицательная логика<br> |

Аналоговые и импульсные сигналы могут быть модулированными и немодулированным

Аналогові сигнали обробляються аналоговими пристроями, які працюють у лінійному режимі, тобто не змінюють своєї функції у всьому робочому діапазоні вхідного сигналу. З дискретними сигналами працюють елементи та пристрої, у яких використовуються як лінійний, так і нелінійний режим активних елементів.

Для математичного опису аналогових пристроїв та сигналів, а також пристроїв імпульсної техніки та імпульсних сигналів використовуються класичні та операторні методи математики та електротехніки. Пристрої та елементи цифрової техніки описуються за допомогою логіки алгебри.

Аналогові та імпульсні сигнали можуть бути модульованими та немодульованими.

При модуляції використовується певний фізичний процес, який називається переносником або несе. Математичної моделлю переносника може бути функція часу  $Z(t, A, B, \dots)$ , залежить також від властивостей  $A, B, \dots$

Деякі параметри функції фіксовані, і вони можуть грати роль ідентифікуючих параметрів, тобто. з них можна визначати належність даного сигналу до певного класу сигналів.

Інші параметри піддаються впливу, який називається модуляцією, а ці параметри відіграють роль інформативних параметрів.

У випадку модуляція є відображення безлічі можливих значень вхідного сигналу на безліч значень інформативного параметра переносника. Пристрій, що здійснює модуляцію, називається модулятором. Пристрій, який здійснює зворотне перетворення, називається демодулятором.

## 2. Характеристика безперервного гармонійного сигналу



Гармонічний сигнал - це гармонійні коливання, що згодом розповсюджуються в просторі,

. Гармонічні коливання – коливання, у яких коливається величина змінюється з часом за законом синуса чи косинуса.

1. Коливання, що зустрічаються в природі та техніці, близькі до гармонійних.
2. Різні періодичні процеси можна як накладення гармонійних коливань

$$x = A \cos(\omega_0 t + \phi)$$

$A$  – максимальне значення коливається величини (амплітуда)

( $x$  набуває значень від  $+A$  до  $-A$ )

$\omega_0$  – кругова (циклічна) частота ( )

$(\omega_0 t + \varphi)$  - фаза коливання. Вона визначає зміщення коливається від положення рівноваги в даний момент часу  $t$ .

$\varphi$  – початкова фаза. Вона визначає зміщення коливається від положення рівноваги в початковий момент часу  $t=0$ .

Період коливань ( $T$ ) – час, протягом якого відбувається одне повне коливання.

За період фаза коливання отримує збільшення  $2\pi$ .

$$\omega_0(t+T) \varphi = (\omega_0 t + \varphi) + 2\pi \text{ звідки}$$

Частота коливань ( $\nu$ ) – Число повних коливань. Вчиняються в одиницю часу. (величина зворотна періоду)  $[\nu] = \text{Гц}$

## Лекція 24

**Тема: Характеристика імпульсного поодинокого і періодичного сигналів, квантованого, дискретно-квантованого і цифрового сигналів.**

**Мета:** Вивчити типи та властивості імпульсного поодинокого і періодичного сигналів, квантованого, дискретно-квантованого і цифрового сигналів.

### Запитання лекції:

1. Характеристика імпульсного поодинокого і періодичного сигналів.
2. Характеристика , квантованого, дискретно-квантованого і цифрового сигналів

### 1. Характеристика імпульсного поодинокого і періодичного сигналів,

Імпульсні сигнали (одинокі імпульси) існують лише протягом короткого проміжку часу, а в усі інші моменти їх значення тотожно дорівнюють нулеві.

Всі реальні фізичні сигнали є дійсними функціями часу, але залежно від потреб методів аналізу найчастіше використовують такі способи їх математичного опису:

- а) опис сигналу як функції часу - часовий опис;
- б) опис сигналу як деякої функції частоти - частотний (спектральний) опис;
- в) опис сигналу в операторній формі - операторний опис.

У багатьох випадках для спрощення аналізу проходження сигналів через електронні кола доцільно описати сигнал як сукупність вибраних певним чином **елементарних (найпростіших) сигналів**. До елементарних сигналів належать: гармонічне коливання, одиничний стрибок (функція Хевісайда), дельта-імпульс (функція Дірака). Гармонічне коливання використовують при частотному (спектральному) описі сигналів, а одиничний стрибок та дельта-імпульс - при часовому описі, який інколи називають **динамічним описом**.

Електричний сигнал як матеріальний носій інформації, являє собою певну змінну фізичну величину (напругу, струм, заряд, магнітний потік), яку називають **коливанням**.

Розрізняють дві основні групи сигналів: детерміновані та випадкові (стохастичні).

**Детермінованими** називають такі сигнали, значення яких у будь-який момент часу є точно відоме, тобто їх можна передбачити безпомилково. Такі сигнали не несуть нової інформації, проте їх використовують як тестові сигнали при дослідженні різних електронних кіл та пристроїв.

**Випадковими** називають такі сигнали, значення яких у будь-який момент часу неможливо передбачити абсолютно точно. Випадковими сигналами є різноманітні електромагнітні коливання атмосферного та промислового походження, а також сигнали інших передавальних станцій, які перешкоджають прийманню інформаційних сигналів. Отже, випадкові сигнали можна поділити на корисні та завади (шуми).

***Детерміновані та випадкові сигнали - дві основні групи сигналів.***

Зауважимо, що поділ усієї розмаїтості сигналів на детерміновані та випадкові є відносним. Наприклад, корисний сигнал, прийнятий на

приймальному пункті, є для адресата випадковим, бо адресат наперед не знає змісту інформації, яку несе даний сигнал. У той же час цей сигнал на передавальному пункті вважається детермінованим, оскільки там точно відома інформація, яку несе сигнал.

Сигнали також прийнято класифікувати залежно від характеру зміни в часі та на множині значень.

Розрізняють сигнали неперервні та дискретні в часі. **Неперервні в часі** сигнали існують у кожен момент часу. **Дискретні в часі** сигнали появляються лише в певні моменти часу.

Крім того, розрізняють сигнали неперервні та дискретні на множині значень. **Неперервні на множині значень** сигнали можуть приймати неперервну множину значень (континуум значень) у заданому інтервалі, тобто їх миттєві значення можуть змінюватись плавно, хоча також можуть мати окремі стрибки. **Дискретні на множині значень** сигнали можуть приймати лише дискретні значення у заданому інтервалі, тобто їх миттєві значення можуть змінюватись лише стрибкоподібно.

### **3. Характеристика , квантованого, дискретно-квантованого і цифрового сигналів**

На підставі цієї класифікації можна виділити такі чотири типи сигналів:

1. **Аналогові** або континуальні - неперервні в часі та на множині значень.
2. **Дискретизовані** - дискретні в часі та неперервні на множині значень.
3. **Квантовані** - неперервні в часі та дискретні на множині значень.
4. **Цифрові** - дискретні одночасно в часі та на множині значень.

Отже, будь-яке первинне повідомлення може бути перетворене у будь-який із чотирьох наведених вище типів сигналів. Наприклад, первинне повідомлення у вигляді неперервного звукового сигналу можна перетворити:

а) в аналоговий електричний сигнал  $s_A(t)$ , миттєві значення якого пропорційні силі звуку (рис.1.1а);

б) у дискретизований сигнал  $s_D(t)$ , який є послідовністю коротких імпульсів, амплітуди яких пропорційні силі звуку в дискретні моменти часу (рис.1.1 б);

в) у квантований сигнал  $s_K(t)$ , який є послідовністю стрибкоподібних змін з дозволеними фіксованими значеннями, що відповідають миттєвим значенням звукового сигналу з деякою допустимою похибкою (рис.1.1 в);

г) у цифровий сигнал  $s_U(t)$ , який є послідовністю коротких імпульсів, амплітуди яких можуть приймати дозвалені фіксовані значення, що відповідають миттєвим значенням звукового сигналу з певною допустимою похибкою (рис.1.1 г).

***Первинне повідомлення можна перетворити в один із чотирьох можливих типів сигналів: аналоговий, дискретизований, квантований, цифровий.***

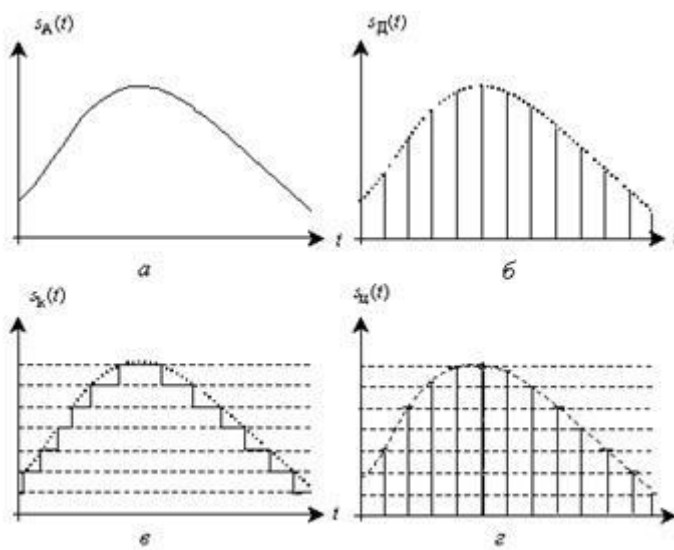


Рисунок 1. Аналоговий (а), дискретизований (б), квантований (в) та цифровий (г) сигнали, які відповідають одному й тому ж первинному повідомленню

## Лекция 25

**Тема: Поняття модуляції сигналу, види модуляції. Амплітудна модуляція. Кутова модуляція сигналу, імпульсна модуляція сигналу. Спеціальні види модуляції**

**Мета:** Вивчити типи та властивості різних типів модуляції.

**Запитання лекції:**

1. Поняття модуляції сигналу, види модуляції.
2. Амплітудна модуляція.
3. Кутова модуляція сигналу,
4. Імпульсна модуляція сигналу. Спеціальні види модуляції

### **1.Поняття модуляції сигналу, види модуляції.**

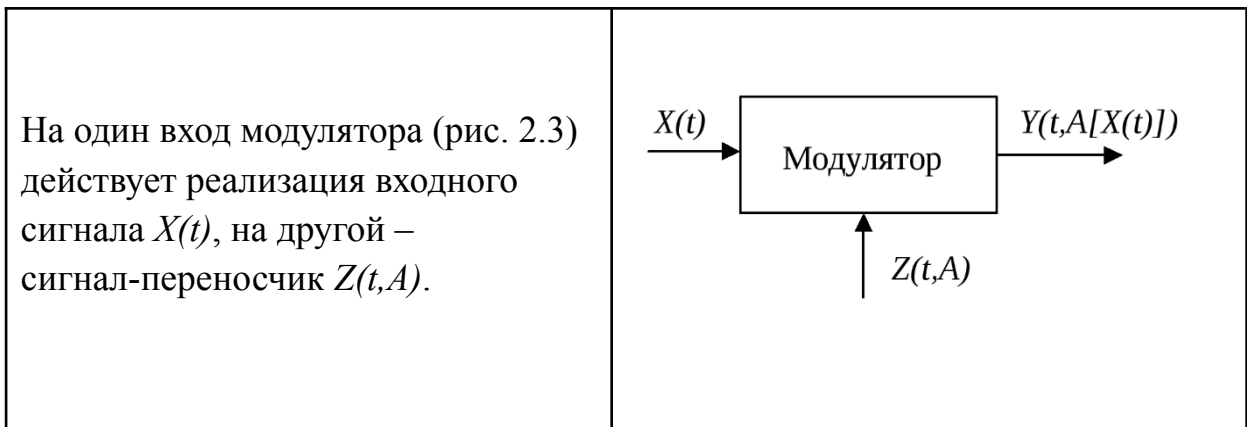
Аналогові та імпульсні сигнали можуть бути модульованими та немодульованими.

При модуляції використовується певний фізичний процес, який називається переносником або несе. Математичної моделлю переносника може бути функція часу  $Z(t, A, B, \dots)$ , залежить також від властивостей  $A, U, \dots$

Деякі параметри функції фіксовані, і вони можуть грати роль ідентифікуючих параметрів, тобто. з них можна визначати належність даного сигналу до певного класу сигналів.

Інші параметри піддаються впливу, який називається модуляцією, а ці параметри відіграють роль інформативних параметрів.

У випадку модуляція є відображення безлічі можливих значень вхідного сигналу на безліч значень інформативного параметра переносника. Пристрій, що здійснює модуляцію, називається модулятором. Пристрій, який здійснює зворотне перетворення, називається демодулятором.



Модулятор формує вихідний сигнал  $Y(t,A[X(t)])$ , інформативний параметр якого змінюється в часі відповідно до сигналу, що передається.

Основне призначення модуляції полягає в перенесенні спектра сигналу задану частотну область.

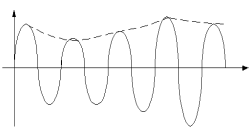
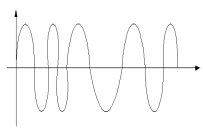
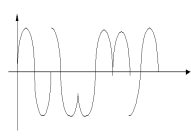
## 2. Амплітудна модуляція.

Залежно від виду переносника, що використовується при модуляції, розрізняють безперервні (аналогові) та імпульсні види модуляції.

При безперервній модуляції як несучий використовується гармонійне коливання.

Нехай, наприклад,  $Z(t) = U_m \sin(\omega t + \phi_0)$ . Як інформативні параметри можуть бути використані амплітуда  $U_m$ , частота, фаза. Назва модуляції визначається за тим, який параметр коливання використовується як інформативний (табл. 2.2).

| Таблица 2.2. Виды непрерывной модуляции |                                          |          |          |
|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------|----------|
| Несущая                                 | $Z(t) = U \cdot \sin(\omega t + \phi_0)$ |          |          |
| Информативный параметр                  | $U_m$                                    | $\omega$ | $\phi_0$ |

|                             |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Вид модулированного сигнала |  |  |  |
| Название вида модуляции     | амплитудная                                                                       | частотная                                                                          | фазовая                                                                             |

При імпульсних видах модуляції як несучу використовується періодична послідовність прямокутних імпульсів. Якщо за імпульсної модуляції змінюється амплітуда імпульсів, це амплітудно-імпульсна модуляція (АИМ), тривалість імпульсу – широтно-імпульсна модуляція (ШИМ), період слідування імпульсів – час-імпульсна модуляція (ВИМ).

Застосовуються також комбіновані види модуляції, коли використовуються кілька інформаційних параметрів несучої. Існують комбіновані методи модуляції як безперервної, так імпульсної модуляції. Приклади: АЧМ – амплітудно-частотна модуляція, АШІМ – амплітудно-широтно-імпульсна модуляція.

Модуляція – це процес нелінійний, її результат також нелінійним. Наприклад, якщо  $u_1(t)$  – сигнал, а  $Z(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \phi_0)$  – несуча, тоді при амплітудній модуляції

$$X(t) = u_1(t) = at, \text{ а } Z(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \phi_0),$$

,

$$Y(t) = (U_m + \Delta U \cdot u_1(t)) \cdot \sin(\omega t + \phi_0) = [U_m \cdot \sin(\omega t + \phi_0)] \cdot [1 + K_{AM} \cdot u_1(t)]$$

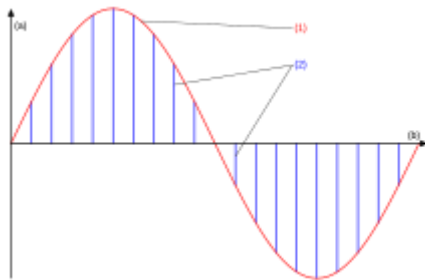
де  $K_{AM}$  – Коефіцієнт амплітудної модуляції, що визначає глибину модуляції. Таким чином, для отримання виконується операція перемноження, що є нелінійною, тому і схема, що її реалізує (модулятор), є нелінійним пристроєм.

### 3. Кутова модуляція сигналу.

Отже, схеми модулятора та демодулятора – нелінійні пристрої. У схемах модулятора та демодулятора застосовуються нелінійні активні та пасивні елементи (діоди, транзистори), які працюють як у лінійному, так і в нелінійному (ключовому) режимі.

Вибір тієї чи іншої форми подання інформації називається кодуванням у сенсі. Зворотний процес виявлення інформації, поданої у сигналі, називається декодуванням у сенсі. Під кодуванням у вузькому значенні розуміються перетворення дискретних форм подання інформації. Таким чином, кодування в широкому сенсі включає і модуляцію, і кодування у вузькому

### 4. Імпульсна модуляція сигналу.



Принцип РАМ: (1) вхідний сигнал, (2) РАМ сигнал, (а) амплітуда сигналу.

Імпульсна модуляція — зміна параметрів імпульсних сигналів у часі чи просторі. Зазвичай імпульсна модуляція є різновидом модульованих коливань, де як «переносник» інформації використовується послідовність імпульсів. Вид імпульсної модуляції визначається законом зміни параметрів (амплітуди, тривалості, фази, частоти проходження) імпульсних сигналів. Відповідно до цього розрізняють 4 основних види імпульсної модуляції:

- амплітудно-імпульсну (англ. *Pulse-amplitude modulation*, РАМ),

- широотно-імпульсну,
- фазово-імпульсну (англ. *Pulse-position modulation*, PPM). Одним із способів здійснення PPM сигналу є затримка (або випередження) появи імпульсу по відношенню до початку періоду на час, відповідний значенню інформаційних символів (модулюємого сигналу). При цьому імпульси мають постійну тривалість. Характерно, що як і у випадку широкоотно-імпульсної модуляції, частота проходження імпульсів ФІМ-сигналу є постійною величиною.

При фазово-імпульсній модуляції кодування переданої інформації в ряді програм полягає в зміні позиції імпульсів в групі імпульсів, яка називається кадром.

- частотно-імпульсну (англ. *Pulse-Frequency Modulation*, PFM) — вид імпульсної модуляції, при якій управління середнім значенням вихідного параметра здійснюється шляхом зміни частоти проходження імпульсів з незмінною тривалістю. Для представлення аналогового сигналу з використанням тільки двох рівнів (1 і 0).

**Використання** імпульсної модуляції використовують у техніці зв'язку, де в ряді випадків вона дозволяє реалізувати більшу завадостійкість порівняно з тією, яка може бути отримана, коли переносником інформації служать гармонічні сигнали. Імпульсна модуляція знайшла застосування в системах і пристроях обчислювальної та інформаційно-вимірювальної техніки з цифровим (дискретним) поданням аналогових сигналів, зокрема в аналогово-цифрових перетворювачах, цифрових фільтрах та інших пристроях.

У системах оптич. і ВЧ-радіолокації і зв'язку імпульсну модуляцію застосовують для модуляції гармонічних сигналів (див. Амплітудна модуляція). В цьому випадку можлива реалізація складних видів імпульсної модуляції, коли поряд зі зміною параметрів огинаючої (послідовності імпульсів) використовується модуляція ВЧ-заповнення імпульсів. Прикладом такої імпульсної модуляції може служити лінійна частотна модуляція, що реалізує зміну частоти заповнення за лінійним законом.

У радіолокації імпульсна модуляція дозволяє не тільки сформувати потужні короточасні випромінювання для виявлення і визначення параметрів руху цілей, але й отримати конкретні оцінки їх розмірів, конфігурації, швидкості обертання навколо центра ваги. Імпульсну модуляцію використовують також

для ідентифікації фізичних параметрів (температури, щільності, ступеня іонізації і т. д.) різноманітних об'єктів і середовищ

## Лекція 26

**Тема: Поняття детектування сигналу, амплітудне детектування, частотне детектування сигналів. Фазове детектування сигналів.**

**Мета:** Вивчити різні типи та властивості детектування

**Запитання лекції:**

1. Загальний опис демодуляції, або детектування сигналу
2. . Амплітудне детектування.
3. Фазове детектування сигналів
4. Частотне детектування сигналів.

### 1. Загальний опис демодуляція, або детектування сигналу

Демодуляція, або детектування (англ. *demodulation, detection, rectification*), — перетворення високочастотних модульованих (наприклад, за амплітудою) коливань для виділення низькочастотного сигналу; є процесом, зворотним до модуляції коливань, і складовою частиною радіоприйому.

Найбільш поширений випадок детектування — демодуляція — процес, зворотний модуляції, тобто виділення НЧ модулюючого сигналу з модульованих ВЧ коливань (наприклад, виділення коливань звукової частоти або сигналів зображення).

У більшості детекторів демодуляція здійснюється за допомогою електронних приладів з нелінійною ВАХ (діодів, транзисторів тощо). Відповідно до видів модуляції коливань розрізняють амплітудні, частотні і фазові детектори. У амплітудному детекторі, призначеному для детектування амплітудно-модульованих (АМ) коливань, як елемент з нелінійною ВАХ найчастіше застосовують напівпровідниковий діод. У колі детектора АМ-коливання перетворюються на ВЧ-імпульси струму одного напрямку, амплітуда яких змінюється за законом модуляції ВЧ коливань. Цей струм створює на резисторі в колі діода імпульси напруги, амплітуда яких також змінюється за законом модуляції. Резистор з'єднується з діодом або

послідовно (послідовний детектор), або паралельно (паралельний детектор). За допомогою електричного фільтра низьких частот із спектра імпульсної напруги виділяються коливання звукової частоти, що повторюють модулюючий сигнал. Здебільшого продетектована напруга підводиться потім до підсилювача електричних коливань.

Детектування сигналів

*Детектування—це процес, зворотний до аналогової модуляції.* Детектування виконується детектором. Головна вимога до детектора – його вихід пропорційний значенням певного параметра смугового сигналу, поданого на його вхід. Цей параметр визначає назву детектора: амплітудний детектор, частотний детектор, фазовий детектор.

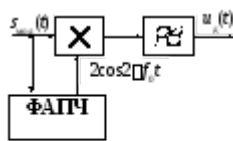
## 2. Амплітудне детектування.

Амплітудний детектор буває двох видів: *синхронний детектор* і *детектор обвідної*. Схему **синхронного детектора** наведено на рис. 4.20. Цей детектор називається також когерентним. Обидві назви пов'язані з тим, що *опорне коливання повинне бути когерентним до несінного коливання, на основі якого сформований модульований сигнал* (мають збігатись повні фази цих коливань). Таке коливання виробляє система фазового автоматичного підстроювання частоти (ФАПЧ) (для її роботи у випадку ОМ необхідно передавати пілот-сигнал). *Синхронний детектор використовується для детектування АМ, БМ і ОМ сигналів.* У правильності процесу детектування можна переконатися, проводячи аналіз проходження сигналів перерахованих видів модуляції через схему детектора. ФНЧ на рис. 4.20 виконує роль післядетекторного фільтра.

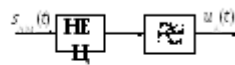
У **детектора обвідної** вихід пропорційний обвідній смугового сигналу, поданого на його вхід. Оскільки при АМ обвідна модульованого сигналу пропорційна модулюючому сигналу, то детектор обвідної забезпечує детектування АМ сигналу (і тільки). Такий детектор не вимагає когерентного опорного коливання відповідно системи ФАПЧ. Цим пояснюється друга назва детектора обвідної – некогерентний детектор. Для детектування сигналу АМ використовується його властивість, що в спектрі сигналу є потужне коливання несінної частоти. На рис. 4.21 наведена схема некогерентного детектора АМ сигналу на основі нелінійного електричного кола (НЕ), яке описується поліномом, що містить доданок  $x^2$ . У спектрі

сигналу на виході нелінійного кола будуть міститись коливання різницевих частот: верхньої бічної смуги й несівної, а також несівної й нижньої бічної смуги частот. Ці різницеві частоти виділяє ФНЧ, що й забезпечує в підсумку детектування сигналу АМ.

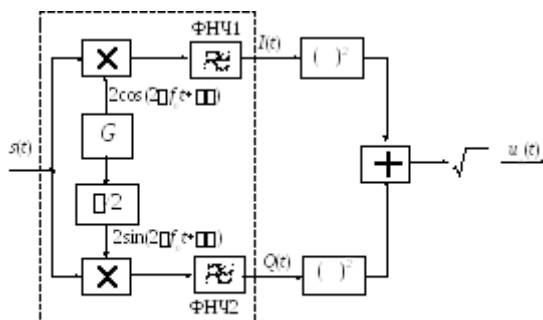
У загальному випадку (у тому числі, якщо у спектрі сигналу, що детектується, немає несівного коливання) використовується детектор обвідної, що функціонує за виразом (2.96), до складу якого входить квадратурний розщеплювач (обведений штриховою лінією) (рис. 4.22). Квадратурний розщеплювач виділяє квадратурні складові модульованого сигналу  $I(t)$  і  $Q(t)$ . Тут  $\Delta\phi$  – довільна початкова фаза опорного коливання. Вихідна напруга детектора  $u_d(t)$  пропорційна обвідній смугового сигналу  $y(t)$ .



**Рисунок 4.20** – Схема  
синхронного детектора



**Рисунок 4.21** – Схема некогерентного детектора на основі нелінійного елемента



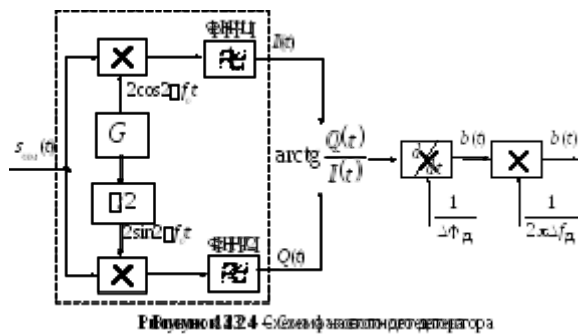
**Рисунок 4.22** – Схема детектора обвідної на основі квадратурного розщеплювача

### 3.Фазове детектування сигналів

Фазовий детектор (рис. 4.23) також виконується на основі квадратурного розщеплювача. Прирости фази обчислюються відповідно до виразу (2.72), як арктангенс відношення  $Q(t)I(t)$ . Для безпосереднього отримання сигналу  $b(t)$  вихід арктангенса необхідно поділити на девіацію фази  $\Delta\phi_d$ , яка є параметром модульованого сигналу.

#### 4.Частотне детектування сигналів.

Схема частотного детектора наведена на рис. 4.24. Вона більшою своєю частиною збігається зі схемою фазового детектора, оскільки відповідно до виразів (2.97) і (4.19) приріст частоти є похідною від приростів фази, які і визначає фазовий детектор. Відповідно, після обчислення арктангенса у схемі частотного детектора увімкнено обчислювач похідної. Аналогічно до фазового детектування, для безпосереднього отримання сигналу  $b(t)$ , прирости частоти необхідно поділити на девіацію частоти  $2\pi\Delta f_d$ .



#### Лекція 27

**Тема:** Спектральне представлення сигналів. Перетворення Фур'є, ряд Фур'є.

**Мета:** Вивчити основі спектрального представлення сигналів

**Запитання лекції:**

1. Загальне уявлення про можливість спектрального подання сигналів
2. Спектри періодичних і неперіодичних сигналів
3. Спектри періодичних і неперіодичних сигналів

## **1. Загальне уявлення про можливість спектрального подання сигналів**

### **Перетворення сигналів та їх спектральні характеристики**

Інформація сприймається споживачем через сигнали, які генеруються або безпосередньо джерелом, або за допомогою генераторів, що не зв'язані з джерелом (локація). Сигнали мають енергетичну та матеріальну основу – світлові потоки, звукові хвилі, теплове випромінювання, зображення точок, неоднорідності електричного і магнітного полів. Сигналами можуть бути документи, книжки, графіки, таблиці і т. ін. Отже, сигнали різняться за фізичною природою. В електронних системах сприйняття сигналів різної фізичної природи здійснюється первинними перетворювачами, які перетворюють інформаційний параметр в сигнал, що є зручним для подальшої обробки.

Важливий елемент інформаційного процесу – передача інформації. Вона відбувається за допомогою повідомлень – послідовності сигналів в часі або просторі, відповідно повідомлення будуть часові або просторові.

Повідомлення складаються із матеріальних елементів, якими вони представлені. Це є абетка повідомлення (знаки, символи, колір, частота, інтенсивність і т. ін.), що містить певну кількість елементів. Передача інформації здійснюється за допомогою переносників інформації. Матеріальну основу переносника інформації складає певний фізичний об'єкт або процес, який характеризується набором параметрів. Один із цих параметрів може стати інформаційним, якщо він змінюється під впливом джерела інформації (модуляція параметра). Власне, після модуляції переносник перетворюється в носія інформації.

Як переносники інформації використовуються коливання різної природи, зокрема – гармонічні коливання, включно з нульовою частотою. В електронних системах знайшли поширення переносники у вигляді коливань електричного струму або напруги – електричні сигнали. Якщо частота коливань дорівнює нулю, є лише один інформаційний параметр – рівень струму або напруги. Якщо частота коливань відрізняється від нуля, інформаційними параметрами можуть бути амплітуда, частота або фаза коливань.

Отже, сигнал – змінна фізична величина, що забезпечує передачу інформації лінією зв'язку.

Загалом всі сигнали розподіляються на детерміновані (невипадкові) і випадкові.

Детермінований сигнал характеризується визначеністю його значень в будь-які моменти часу (задаються певною визначеною функцією часу). Випадковий сигнал характеризується тим, що його значення в будь-який момент часу є випадковими величинами. Випадковими можуть бути як корисні (інформаційні) сигнали, так і шкідливі сигнали – завади, які перешкоджають сприйняттю інформаційних сигналів.

Як приклад детермінованого сигналу можна навести синусоїдальну хвилю, яка графічно описується синусоїдою. Синусоїда – це функція часу  $t$ , яка записується так:

$$f(t) = A \sin(\omega t + \theta),$$

де величину сигналу визначає коефіцієнт  $A$ , названий амплітудою;

$\omega$  – кутова частота;

$\theta$  – початкова фаза.

Синусоїда разом з трикутним, пилкоподібним, прямокутним та іншими сигналами належить до періодичних сигналів, тобто до таких сигналів, які повторюють свою форму через деякий сталий проміжок часу.

Будь-який складний періодичний сигнал може бути поданий за допомогою ряду Фур'є як сума простих гармонічних коливань. Сукупність простих гармонічних коливань, на які може бути розкладений складний періодичний сигнал, називається його спектром.

Розподіл амплітуд гармонік за частотою називають амплітудно-частотним спектром або скорочено амплітудним спектром, а розподіл їхніх початкових фаз за частотою – фазочастотним спектром або фазовим спектром.

Синусоїда разом з трикутним, пилкоподібним, прямокутним та іншими сигналами належить до періодичних сигналів, тобто до таких сигналів, які повторюють свою форму через деякий сталий проміжок часу.

Будь-який складний періодичний сигнал може бути поданий за допомогою ряду Фур'є як сума простих гармонічних коливань. Сукупність простих

гармонічних коливань, на які може бути розкладений складний періодичний сигнал, називається його спектром.

Розподіл амплітуд гармонік за частотою називають амплітудно-частотним спектром або скорочено амплітудним спектром, а розподіл їхніх початкових фаз за частотою – фазочастотним спектром або фазовим спектром.

Лінії дискретного спектра мають розмірність амплітуди сигналу.

Безперервний спектр указує на розподіл амплітуд по всьому спектрі й має розмірність щільності амплітуд сигналу.

Якщо спектр сигналу є необмеженим, то при визначенні ширини нехтують гармоніками, амплітуди яких невеликі й не перевищують певного (заданого) рівня. Найбільш часто користуються рівнем 0,707 за амплітудою або 0,5 за потужністю від максимального значення.

### Перетворення Фур'є

Перетворення Фур'є – інтегральне перетворення однієї комплексно-значної функції дійсної змінної на іншу, тісно пов'язане з перетворенням Лапласа та аналогічне розкладу у ряд Фур'є для неперіодичних функцій. Це перетворення розкладає дану функцію на осциляторні функції.

Використовується для того, щоби розрахувати спектр частот для сигналів змінних у часі (таких як мова або електрична напруга). Перетворення названо на честь французького математика Жана Батиста Жозефа Фур'є, який ввів це поняття в 1822 році.

Перетворення Фур'є функції  $f(t)$  математично визначається як комплексна функція  $F(\omega)$ , яка задається інтегралом

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Обернене перетворення Фур'є задається виразом

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega = f(t).$$

Серед властивостей перетворення Фур'є можна відмітити такі.

### 3.Спектри періодичних і неперіодичних сигналів

Відомо, що будь-яка періодична функція, яка задовольняє умови Діріхле, може бути подана у вигляді нескінченної у загальному випадку суми гармонічних складових – рядом Фур'є. Умова Діріхле полягає у тому, що: функція  $x(t)$  повинна бути обмеженою, кусочно-неперервною та мати протягом періоду скінченне число екстремумів.

Відомо дві форми розкладання в ряд Фур'є: тригонометрична й комплексна. Тригонометрична форма розкладання виражається у вигляді

$$x(t) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(K\omega_0 t - \varphi_k)$$

де  $\frac{1}{2}A_0$  – постійна складова функції  $x(t)$ ;

$A_k \cos(K\omega_0 t - \varphi_k)$  –  $k$ -та гармонічна складова;

$A_k, K\omega_0, \varphi_k$  – амплітуда, частота та початкова фаза  $k$ -тої гармонічної складової;

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  – частота основної (першої) гармоніки;

$T$  – період зміни функції  $x(t)$ .

Сукупність амплітуд і відповідних частот гармонік прийнято називати спектром амплітуд.

Сукупність початкових фаз і відповідних частот гармонік називають спектром фаз.

На рис. 1. подані графічні зображення спектра амплітуд і спектра фаз періодичного сигналу.

Окремі спектральні складові у графічному зображенні спектра амплітуд називають спектральними лініями.

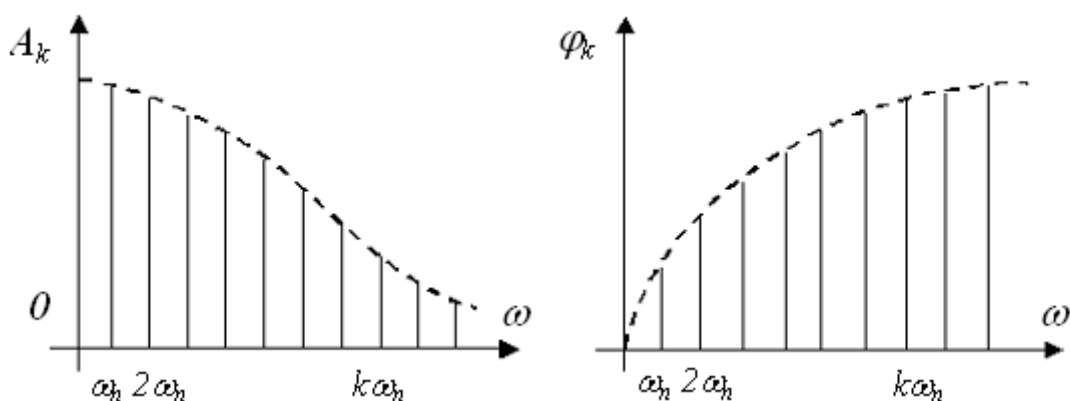


Рисунок 1 – Графічні зображення спектра амплітуд і спектра фаз періодичного сигналу

Будь-який неперіодичний сигнал можна розглядати як періодичний, період зміни якого дорівнює нескінченності. У зв'язку з цим розглянутий раніше спектральний аналіз періодичних процесів може бути узагальнений і на неперіодичний сигнал.

Розглянемо як буде змінюватись спектр неперіодичного сигналу при необмеженому збільшенні періоду зміни сигналу. При збільшенні періоду  $T$  інтервали між суміжними частотами в спектрі сигналу і амплітуди спектральних складових зменшується і в границі при  $T \rightarrow \infty$  стають нескінченно малими величинами. При цьому спектральний розклад неперіодичного сигналу відображається рядом Фур'є.

## Лекція 28

### Тема: Амплітудний і фазовий спектри монохроматичного сигналу та модульованого сигналу

#### Мета:

#### Запитання лекції:

Так, складний сигнал який періодично повторюється з частотою  $\omega_0 = 2\pi/T_0$ , (де  $T_0 = 1/f_0$  – період повторення), можна описати рядом Фур'є у тригонометричній формі у базисі гармонічних функцій з кратними частотами:

$$s(t \pm nT_0) = s(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [C_k \cos(k\omega_0 t) + S_k \sin(k\omega_0 t)],$$

(1.4a)

або в компактнішій формі:

Ряд Фур'є – спектральний опис складного періодичного сигналу.

$$s(t \pm nT_0) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k), \quad (1.4б)$$

де  $A_0$  – постійна складова (середнє значення сигналу за період);

$C_k$  та  $S_k$  – амплітуди косинусних та синусних складових  $k$ -го порядкового номера;

$A_k, j_k$  – амплітуда та початкова фаза  $k$ -ї гармонічної складової.

Ці величини визначають на підставі формул:

$$A_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} s(t) dt, \quad (1.5)$$

$$C_k = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} s(t) \cos(k\omega_0 t) dt, \quad (1.6)$$

$$S_k = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} s(t) \sin(k\omega_0 t) dt, \quad (1.7)$$

Амплітуду  $A_k$  та початкову фазу  $j_k$   $k$ -ї гармонічної складової визначають через  $C_k$  та  $S_k$ :

$$A_k = \sqrt{C_k^2 + S_k^2}, \quad (1.8)$$

$$j_k = -\arctan(S_k/C_k). \quad (1.9)$$

Зауважимо, що вирази (1.4a) та (1.4б) справедливі, якщо функція  $s(t)$  задовольняє умови Діріхле, тобто протягом періоду вона може

мати скінченну кількість розривів першого роду, а також скінченну кількість максимумів та мінімумів і задовольняє умову абсолютної інтегрованості:

Практично усі реальні сигнали задовольняють умови Діріхле, тому на практиці при спектральному поданні сигналів ці умови спеціально не акцентують.

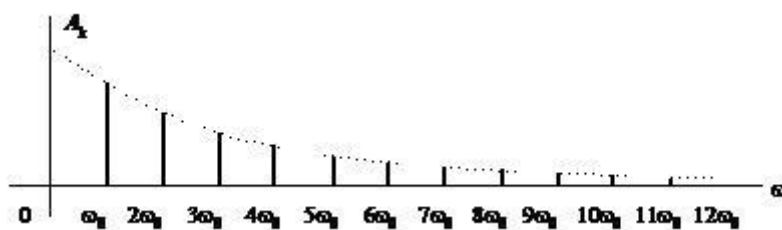
Спектри періодичних сигналів є дискретними (лінійчастими).

Отже, вирази (1.4а, 1.4б) описують спектр складного періодичного сигналу, який в загальному випадку складається з постійної складової  $A_0$  та нескінченної кількості гармонічних складових, частоти яких становлять дискретний ряд значень  $k\omega_0$  ( $k=1,2,3,\dots$ ), кратних основній частоті  $\omega_0$ . Ці складові називають **гармоніками періодичного сигналу**. Спектр, який складається з окремих складових, називають **дискретним** або **лінійчастим**. Гармоніку, яка відповідає номерові  $k=1$ , називають першою або основною гармонікою.

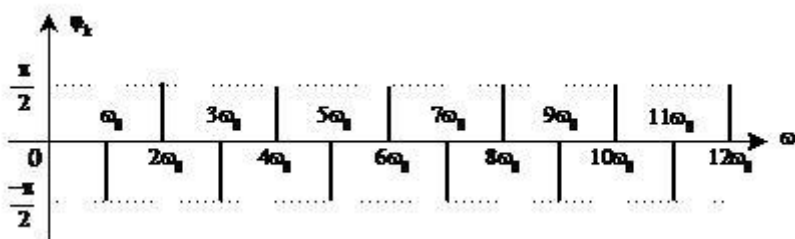
Амплітудний та фазовий спектр – дві основні характеристики сигналів.

У загальному випадку гармоніки, які входять до складу спектра, мають різні амплітуди та початкові фази. Щоб отримати наочне уявлення про спектр сигналу, використовують графічне зображення спектра у вигляді двох спектральних діаграм: амплітудної та фазової. Будуючи їх, на осі абсцис відкладають частоту, а на осі ординат – відповідно величини амплітуд  $A_k$  гармонік та їхні початкові фази  $j_k$ .

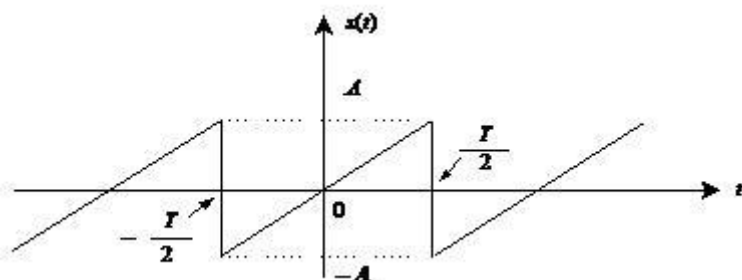
На рис.1 для прикладу зображено амплітудну (а) та фазову (б) спектральні діаграми періодичного сигналу, поданого на рис. 1, в.



а



б



в

Рис.1. Амплітудна (а) та фазова (б) спектральні діаграми періодичного сигналу (в), який повторюється з частотою  $\omega_0 = 2\pi/T$

Із спектральних діаграм видно, що відстань між двома сусідніми гармоніками по осі частот (тобто відстань між вертикальними лініями) дорівнює значенню частоти повторення  $\omega_0$  періодичного сигналу. Це означає, що зі збільшенням частоти  $\omega_0$  повторення або зменшенням періоду  $T_0$  сигналу відстань між вертикальними лініями на спектральних діаграмах збільшується (спектр стає рідшим, але займає ширший діапазон частот) і навпаки. Крім того, як випливає з виразів (1.5) – (1.7), зміна частоти повторення (або періоду) сигналу впливає також і на величину амплітуд гармонік.

## Лекція 29

**Тема:** Амплітудний і фазовий спектри послідовності прямокутних відеоімпульсів та радіоімпульсів

**Мета:** Отримати уявлення про вид амплітудного та фазового спектрів послідовності імпульсів

## Запитання лекції:

1. Спектр періодичної послідовності прямокутних відео імпульсів.
2. Спектральний аналіз періодичної послідовності радіоімпульсів

### 1. Спектр періодичної послідовності прямокутних відео імпульсів.

Відеоімпульс передається на короткі відстані. Нехай  $w(t)$  визначає періодичну послідовність прямокутних відеоімпульсів з амплітудою  $U_m$ , тривалістю  $t_i$  і періодом проходження  $T = \frac{2\pi}{\Omega}$ . Такі імпульси застосовуються у радіолокації, телебаченні, автоматики.

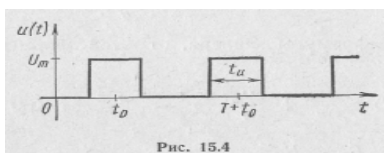


Рис. 15.4

Аналітична форма:  $S(t) = U_m$   $-t_i/2 < t < t_i/2$

1.  $t_i/2 < t < t_i/2 + T$

Коефіцієнти ряду Фур'є:  $a_0/2 = U_m/q$

$$a_n = (2U_m/q) * \sin(n\omega t_i/2) / (n\omega t_i/2) * \cos(n\omega t_0)$$

$$b_n = (2U_m/q) * \sin(n\omega t_i/2) / (n\omega t_i/2) * \sin(n\omega t_0)$$

АЧС і ФЧС:

.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = (2U_m/q) * \sin(n\omega t_i/2) / (n\omega t_i/2);$$

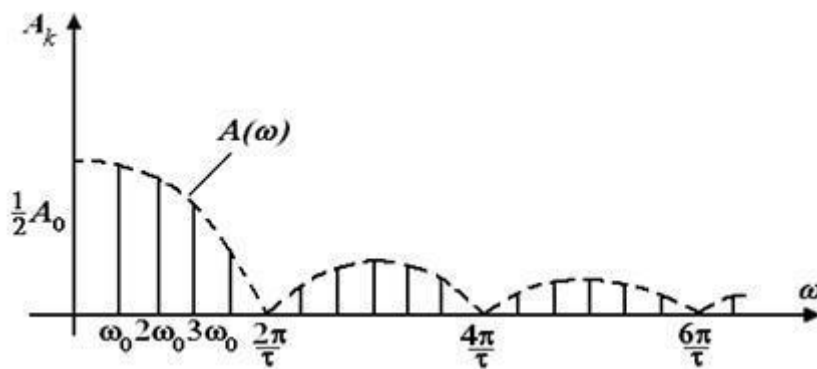
$$\Phi = -\arctg(b_n/a_n).$$

Тригонометрична форма:  $S[t] = a_0/2 + \sum a_n + \sum b_n$

ПППВІ мають спектр у вигляді апроксимованого синуса.  $Sa(x) = \frac{\sin x}{x}$

Переходячи до аналізу спектрів, їх особливості в загальних рисах можна сформулювати так:

1. Спектральні лінії знаходяться один від одного на однаковій відстані, що дорівнює частоті проходження імпульсів  $\Omega$ .
2. Розподіл спектральних ліній по висоті визначається огибаючою спектру, характер якої залежить від форми сигналу.
3. Для побудови спектрів можна скористатися методикою, суть якої в наступному. У точках  $n\Omega$  на відстані  $\Omega$  одна від одної проводяться лінії, перпендикулярні осі частот. У тих же координатах в потрібному масштабі будується обвідна спектру. Точки перетину перпендикулярів з огибаючою спектру визначають висоту спектральних ліній.



## 2. Спектральний аналіз періодичної послідовності радіоімпульсів

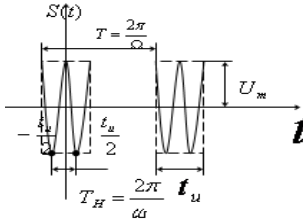
Високочастотний сигнал, що передається на великі відстані, і має частоту  $\omega_H$ .

$\omega_H \gg \Omega$  (еквівалентно  $\omega_1$ )  $\omega_H$  -несущая частота.

Аналитическая форма записи.

$$S(t) = \begin{cases} U_n & -\frac{t_U}{2} \leq t \leq \frac{t_U}{2} \\ 0 & t > \frac{t_U}{2} \end{cases}$$

Аналитична форма запису



Найдем постоянную составляющую  $\frac{a_0}{2}$  :

$$\begin{aligned} \frac{a_0}{2} &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{t_u}{2}}^{\frac{t_u}{2}} U_m \cos \omega_H t dt \Big/ \frac{\omega_H}{\omega_H} = \frac{U_m}{T \cdot \omega_H} \cdot \left[ \sin \omega_H \frac{t_u}{2} - \sin \omega_H \left( -\frac{t_u}{2} \right) \right] = \\ &= \frac{2U_m}{T \omega_H} \sin \omega_H \frac{t_u}{2} = \frac{U_m \Omega}{\pi \omega_H} \sin \omega_H \frac{t_u}{2} \end{aligned}$$

Т. к. достаточно большая величина и находится в знаменателе постоянной составляющей,  $\frac{a_0}{2}$  для радиоимпульсов можно пренебречь.

Найдем  $a_n$  ряда Фурье.

$$a_n = \frac{U_m}{q} \cdot \frac{\sin(\omega_H - n\Omega) \frac{t_u}{2}}{(\omega_H - n\Omega) \frac{t_u}{2}}$$

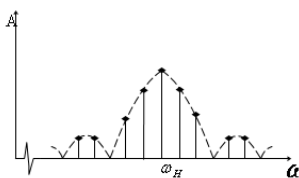
Найдем  $b_n$  ряда Фурье: .

Так как функция симметрична относительно начала отсчета, то равно 0.

Запишем ряд Фурье для данного типа сигнале в общем виде.

$$S(t) = \frac{U_m}{q} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\omega_H - n\Omega) \frac{t_u}{2}}{(\omega_H - n\Omega) \frac{t_u}{2}} \cdot \cos(n\Omega t \pm \pi(n-1))$$

### АЧС-радиоимпульса.



Коефіцієнти ряду: так, як  $W_H \gg \Omega$ , то:

$$a_0/2 \approx 0$$

$$a_n = (U_m/q) * \sin((W_H \pm n\Omega) * t_i/2) / ((W_H \pm n\Omega) * t_i/2) * \cos(n\Omega t_0)$$

$$b_n = (U_m/q) * \sin((W_H \pm n\Omega) * t_i/2) / ((W_H \pm n\Omega) * t_i/2) * \sin(n\Omega t_0)$$

$$A_n = (U_m/q) * \sin((W_H \pm n\Omega) * t_i/2) / ((W_H \pm n\Omega) * t_i/2)$$

\

### Лекция 30

**Тема:** Амплітудний і фазовий спектри поодиноких прямокутних відеоімпульсів та радіоімпульсів

**Мета:** Отримати уявлення про вид амплітудного та фазового спектрів одиночних імпульсів.

**Запитання лекції:**

1. Спектральний аналіз неперіодичних сигналів
2. Неперіодичний прямокутний відео та радіо імпульс

#### 1. Спектральний аналіз неперіодичних сигналів.

Спектральна щільність аналогових сигналів. Пари перетворень Фур'є.

Спектральний аналіз та його математичний апарат можна поширити на клас сигналів, які називаються неперіодичними. Серед них найбільший інтерес у РТ становлять неполярні чи поодинокі імпульси. Нехай одиночний сигнал заданий деякою функцією, яка відрізняється від 0 на інтервалі часу від  $t_1$  до  $t_2$ . Виділимо довільний інтервал часу від  $t_1$  до  $t_2$  який є підмножиною інтервалу  $T$  і подумки розташуємо в кожному інтервалі  $T$  еквівалентні імпульси. Можна вважати цей сигнал періодичним, а значить, він може бути

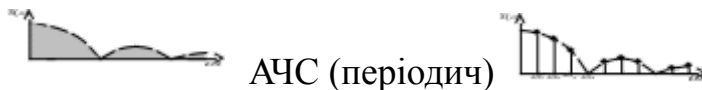
розкладений у ряд Фур'є. 
$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} \quad \text{где} \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{T}$$

Коэффициенты данного ряда определяются из выражения.

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}(t_1)}^{\frac{T}{2}(t_2)} S(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \quad s(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \left( \int_{t_1}^{t_2} S(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right) \cdot \frac{\omega_1}{2\pi} e^{jn\omega_1 t}$$

## 2. Неперіодичний прямокутний відео та радіо імпульс

У ряді (3) враховано, що період дорівнює  $T$ . Поза відрізком часу від 0 до  $t$  ряд (1) визначає періодичну функцію, отриману повторенням сигналу з періодом  $T$ . Для того щоб поза відрізком часу від 0 до  $t$  функція дорівнювала нулю величина  $T$  повинна бути нескінченно великою. Число гармонійних складових, що входять до ряду Фур'є буде нескінченно великим, оскільки  $T \rightarrow \infty$ . Відстань між ними прагнучиме нуля т.к. відстань між спектральними складовими дорівнює  $1/T$  і прагне нуля. Іншими словами спектр стає суцільним.



У зв'язку з тим, що спектр стає суцільним, вводиться поняття спектральної щільності, яка є мірою кількості енергії на одиницю частоти.

За підсумками даних міркувань дискретна частота нічого очікувати змінюватися дискретно, а замінюється на безперервну частоту  $\omega$ , а  $1/T$  на  $d\omega$ .

Після відповідних перетворень перейдемо до подвійного інтеграла Фур'є.

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \int_{t_1}^{t_2} s(t) e^{-j\omega t} dt \right) e^{j\omega t} d\omega \quad (4)$$

Внутренний интеграл в выражении (4) является функцией частоты. Это и есть спектральная плотность:

$$S(\omega) = \int_{t_1}^{t_2} s(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{прямое перетворення Фур'є.}$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{зворотне перетворення Фур'є для сигналу}$$

## 6. Теми практичних занять

| Номер з/п | Номер заняття | Назва теми                                                                                                   | К-во годин | Пер. літ. для вікон. д.з. |
|-----------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------|
| 11        | 1             | Електричні кола постійного струму. Застосування законів Ома і Кірхгофа для розрахунку кіл постійного струму. | 2          | Методичні вказівки        |
| 12        | 2             | Потужності в трифазних колах. Коефіцієнт потужності його важливість для ефективності енергогосподарства      | 2          | Методичні вказівки        |
| 15        | 3             | Магнітні кола. Основні параметри і характеристики. Порядок розрахунку магнітних кіл.                         | 2          | Методичні вказівки        |
| 25        | 4             | Електричні кола з розподіленими параметрами, поняття погонних емністей, індуктивності і опору.               | 2          | Методичні вказівки        |
| 26        | 5             | Рижим роботи довгих ліній. Рижим біжучої та стоячої хвилі в довгій лінії.                                    | 2          | Методичні вказівки        |
| 29        | 6             | Нелінійні електричні кола. Кола послідовного та паралельного обмеження сигналів.                             | 2          | Методичні вказівки        |
| 34        | 7             | Перехідний процес. Поняття перехідного процесу в електричному колі.                                          | 2          | Методичні вказівки        |
| 35        | 8             | Перехідний процес в колах першого порядку. Перехідний процес в електричному CR- колі та LR-колі.             | 2          | Методичні вказівки        |
| 39        | 9             | Характеристика електричних сигналів.                                                                         | 2          | Методичні вказівки        |
| 45        | 10            | Амплітудний і фазовий спектри періодичних сигналів                                                           | 2          | Методичні вказівки        |
| Разом     |               |                                                                                                              | 20         |                           |

## Методичні розробки для практичних занять

### Методична розробка для заняття 1

**Тема:** Електричні кола постійного струму. Застосування законів Ома і Кірхгофа для розрахунку кіл постійного струму.

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 2,3,4,6.

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

1. Основні елементи електричних кіл.
2. Паралельне та послідовне з'єднання резисторів котушок індуктивності
3. Паралельне та послідовне з'єднання конденсаторів.
4. Паралельне та послідовне з'єднання котушок індуктивності
5. Закони Кірхгофа
6. Дати характеристику змінному струму
7. Пояснити поняття: миттєве і діюче значення змінного струму.
8. Як можна уявити сунусоїдальну величину за допомогою вектора? комплексного числа
9. Як можна уявити сунусоїдальну величину за допомогою комплексного числа?
10. Пояснити властивості резистора в колі змінного струму.
11. Пояснити властивості конденсатора в колі змінного струму
12. Пояснити властивості котушки індуктивності в колі змінного струму.
13. Явище резонансу в послідовному колі
14. Явище резонансу в паралельному колі.

Наприкінці заняття викладач робить виводи за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

**Методична розробка для заняття 2.**

**Тема:** Потужності в трифазних колах. Коефіцієнт потужності його важливість для ефективності енергогосподарства.

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 8,9,10.

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

1. Що таке трифазна електрична система?
2. Пояснити отримання трифазної ЕРС.
3. Поняття лінійних та фазних величин струмів та напруг.
4. Зобразити схему з'єднання "зірка-зірка"
5. Зобразити схему з'єднання "трикутник-трикутник"
6. Пояснити поняття: активної, реактивної та повної потужності
7. Що таке трикутник потужностей?
8. Пояснити поняття "коефіцієнт потужності"

Наприкінці заняття викладач робить виводи за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

### **Методична розробка для заняття 3.**

**Тема:** Магнітні кола. Основні параметри і характеристики. Порядок розрахунку магнітних кіл.

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 11,12..

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної

відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

1. Природа магнітного поля.
2. Назвати та пояснити основні векторні параметри МП.
3. Назвати та пояснити основні скалярні параметри МП.
4. Що таке криві намагнічування?
5. Що таке петля гістерезису?
6. Порядок розрахунку параметрів МП у нерозгалуженому магнітному колі, пряме завдання.
7. Порядок розрахунку параметрів МП у нерозгалуженому магнітному колі, обернена задача.
8. Призначення та конструкція трансформатора
9. Два основних закони, на яких заснована робота трансформатора.
10. Класифікація трансформаторів за величиною коефіцієнта трансформації.
11. Що таке трансформатор струму і коли він використовується?
12. Що таке трансформатор напруги і коли він використовується?
13. Які складові втрат на нагрівання?
14. Як визначається ККД трансформатора?
15. Чому магнітопровід трансформатора виготовляють із тонких пластів?

Наприкінці заняття викладач робить виводи за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

#### **Методична розробка для заняття 4.**

**Тема:** Електричні кола з розподіленими параметрами, поняття погонних емністей, індуктивності і опору. .

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 13, 14, 17.

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

1. Яка лінія вважається найдовшою? \
2. Навести приклади довгих ліній?
3. Поясніть поняття: погонні параметри.
4. Що таке характеристичний (хвильовий) опір лінії?
5. Від чого залежить характеристичний опір лінії?
6. Які параметри лінії треба знати, щоб обчислити характеристичний опір конкретної лінії.
7. Пояснити призначення та конструкцію хвилеводу.
8. Пояснити призначення та конструкцію коаксіального кабелю
9. Пояснити призначення та конструкцію двох провідних ліній
10. Пояснити призначення та конструкцію хвилеводного мосту.
11. Пояснити призначення та конструкцію металевого ізолятора.

Наприкінці заняття викладач робить виводи за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

### **Методична розробка для заняття 5.**

**Тема:** Режим роботи довгих ліній. Режим біжучої та стоячої хвилі в довгій лінії.

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 15,16.

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

1. Умова виникнення хвилі, що біжить, в ідеальній лінії.
2. Дати характеристику " хвилі, що біжить в довгій лінії".
3. Умова виникнення стоячої хвилі, в ідеальній лінії
4. Дати характеристику « хвилі, що стоить в довгій лінії».
5. Дати характеристику змішаної хвилі у лінії.
6. Дати визначення коефіцієнта хвилі, що біжить.
7. Чим відрізняється режим роботи лінії з втратами від режиму ідеальної лінії?

Наприкінці заняття викладач робить висновки за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

### **Методична розробка для заняття 6.**

**Тема:** Нелінійні електричні кола. Кола послідовного та паралельного обмеження сигналів.

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 18,19.

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

1. Які елементи називаються нелінійними?
2. Що повинна містити електрична кола, щоб називатися нелінійним?
3. Для чого використовуються обмежувачі наведіть приклад ? прикладі синусоїдальної напруги?
4. Що означає "обмежувач зверху"?
5. Зобразити схему послідовного діодного обмежувача зверху та пояснити його роботу на прикладі синусоїдальної напруги.

6. Зобразити схему паралельного діодного обмежувача зверху та пояснити його роботу на прикладі синусоїдальної напруги
7. Що означає "обмежувач знизу"?
8. Зобразити схему послідовного діодного обмежувача знизу та пояснити його роботу на прикладі синусоїдальної напруги.
9. Зобразити схему паралельного діодного обмежувача знизу та пояснити його роботу на прикладі синусоїдальної напруги
10. Що означає "двосторонній обмежувач"?
11. Зобразити схему паралельного двостороннього обмежувача та пояснити його роботу на прикладі синусоїдальної напруги.

Наприкінці заняття викладач робить висновки за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

### **Методична розробка для заняття 7.**

**Тема:** Перехідний процес. Поняття перехідного процесу в електричному колі.

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 20.

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

1. Який процес в електричному колі називається «перехідним»?
2. Пояснити причину виникнення перехідного процесу.
3. Які елементи електричних кіл здатні накопичувати енергію?
4. Навести та пояснити Закони комутації.
5. Якими рівняннями описується перехідний процес в електричному колі та чим визначається його порядок?
6. Як називається функція, що описує криві перехідного процесу?

7. Що таке вільна складова перехідного процесу?
8. що таке вимушена складова перехідного процесу?

Наприкінці заняття викладач робить виводи за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

### **Методична розробка для заняття 8.**

**Тема:** Перехідний процес в колах першого порядку Перехідний процес в електричному CR- колі та LR-колі.

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 21,22.

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

1. Зобразити графіки струму та напруги при заряді конденсатора і пояснити їх.
2. Зобразити графіки струму та напруги при розряді конденсатора і пояснити їх.
3. Зобразити графіки струму та напруги при підключенні котушки індуктивності до джерела і пояснити їх.
4. Зобразити графіки струму та напруги при короткому замиканні ланцюга з котушкою індуктивності і пояснити їх.

Наприкінці заняття викладач робить виводи за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

## **Методична розробка для заняття 9.**

**Тема:** Характеристика електричних сигналів.

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 23,24.

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

1. Що таке електричний сигнал?
2. Які бувають електричні сигнали?
3. Назвати та пояснити основні параметри електричних сигналів
4. Дати характеристику безперервному періодичному сигналу, навести приклад.
5. Дати характеристику безперервному неперіодичному сигналу, навести приклад.
6. Дати характеристику квантованому сигналу, навести приклад.
7. Дати характеристику дискретизованому сигналу, навести приклад.
8. Дати характеристику цифровому сигналу, навести приклад

Наприкінці заняття викладач робить виводи за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

## **Методична розробка для заняття 10.**

**Тема:** Амплітудний і фазовий спектри періодичних сигналів

**Мета:** Закріпити знання матеріалу лекції 27,28,29,30.

На початку заняття викладач доводить мету та порядок проведення заняття.

У ході заняття викладач ставить питання аудиторії, по черзі викликає студентів до дошки для відповіді; у разі утруднення чи неправильної відповіді звертається до аудиторії. Після закінчення відповіді робить короткий розбір та оцінює студента.

Питання для обговорення.

4. Фізичний сенс перетворення Фур'є.
5. Що таке амплітудний спектр?
6. Що таке фазовий спектр?
7. В чим полягає перевага спектрального представлення сигналів?
8. Зобразити та пояснити амплітудний спектр монохроматичного сигналу.
9. Зобразити та пояснити амплітудний спектр амплітудно модульованого сигналу.
10. Зобразити та пояснити амплітудний спектр частотно модульованого сигналу.
11. Зобразити та пояснити амплітудний спектр послідовності прямокутних відео імпульсів.
12. Зобразити та пояснити амплітудний спектр послідовності прямокутних радіо імпульсів.
13. Зобразити та пояснити амплітудний спектр подиного прямокутного відео імпульса.
14. Зобразити та пояснити амплітудний спектр подиного прямокутного радіо імпульса.

Наприкінці заняття викладач робить виводи за переглянутим матеріалом, підбиває підсумки, оголошує оцінки.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ  
«ОДЕСЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
ОДЕСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ»**

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

**Основи теорії кіл, сигнали та процеси в радіотехніці**

|                                       |                                                                    |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Галузь знань:</b>                  | <b>17 – «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»</b> |
| <b>Спеціальність:</b>                 | <b>172 – «Телекомунікації та радіотехніка»</b>                     |
| <b>Освітньо -професійна програма:</b> | <b>«Телекомунікації та радіотехніка. Робототехніка»</b>            |

## Одеса 2024

**Укладачі:** Лавріненко Юліан Володимирович, викладач, спеціаліст вищої категорії, к.т.н

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
(вказати авторів, їхні посади, звання, категорії)

**Програма обговорена та схвалена** на засіданні циклової комісії «Прикладна механіка, телекомунікації та робототехніка»

Протокол № 1 від “30” 08 2024 року

Голова циклової комісії

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Олександр ТИМОШЕВСЬКИЙ

## **Лабораторна робота №1**

***"Дослідження законів Кірхгофа в електричних колах постійного та змінного струму"***

### **1.1 Паралельне з'єднання приймачів електричної енергії, перший закон Кірхгофа**

**Мета роботи.** Здійснити паралельне з'єднання приймачів електроенергії. Визначити електричні струми в окремих приймачах і загальний струм; переконатися в правильності першого закону Кірхгофа.

**Завдання на підготовку до лабораторної роботи.** В результаті вивчення теоретичного матеріалу студент повинен

**знати:**

- перший і другий закони Кірхгофа;
- порядок визначення провідності елементів і споживаної ними потужності;

- правила безпеки при роботі в лабораторії;

**вміти:**

- збирати електричні кола постійного і змінного струму;

- проводити електричні вимірювання напруги і струму;

- обчислювати значення параметрів електричного кола за результатами вимірювань;

- обчислювати величину потужності, що розсіюється.

**Пояснення.** З'єднання, при якому всі провідники підключені своїми початками до затиснення  $\hat{A}$  (рис. 1), а кінцями до затиснення  $\hat{A}$ , називається паралельним.

Якщо до загального затиснення  $\hat{A}$  або  $\hat{A}$  приєднано більше двох приймачів, то цей зажим називається вузлом.

*Перший закон Кірхгофа говорить, що сума всіх струмів, які протікають до даного вузла, дорівнює сумі струмів, що впливають з нього. Для схеми, представленої на рис.1, рівняння першого закону Кірхгофа буде мати вигляд:*

$$I_1 + I_2 + I_3 = I$$

Напруга на всіх приймачах однакова, тому що їхні кінці приєднані до того самого джерела напруги:

$$U_1 + U_2 + U_3 = U$$

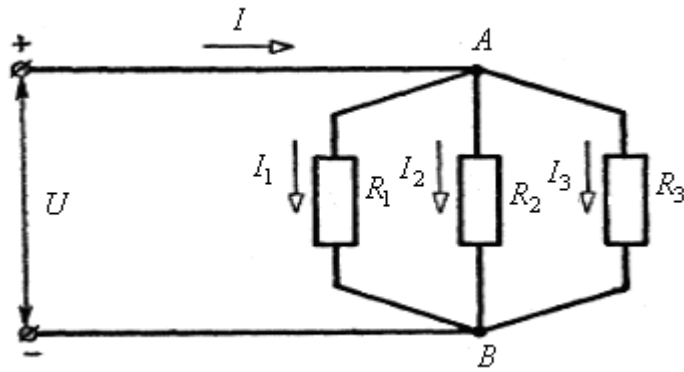


Рисунок 1 – Схема для вивчення паралельного з'єднання приймачів електричної енергії

Струми в окремих гілках визначаються наступним способом:

$$I_1 = UR_1; \quad I_2 = UR_2; \quad I_3 = UR_3.$$

Величина, зворотна опору, називається провідністю:

$$\frac{1}{R} = g; \quad \frac{1}{R_1} = g_1; \quad \frac{1}{R_2} = g_2; \quad \frac{1}{R_3} = g_3.$$

Згідно з першим законом Кірхгофа загальний струм:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Розділивши обидві частини рівності на  $U$  одержимо:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad \text{або} \quad g = g_1 + g_2 + g_3.$$

Таким чином, загальна провідність кола паралельно включених приймачів дорівнює сумі провідностей окремих приймачів.

### Устаткування й апаратура

**Вольтметри постійного і змінного струмів з межами вимірювань 0-30 В; амперметри постійного і змінного струмів з межами вимірювань 0 – 1 А, омметр, набір резисторів, комплект з'єднуючих проводів.**

#### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою вимірювання і приладами.
2. Зібрати схему вимірювання (рис. 2) і перевірити правильність включення всіх приладів.
3. Підключити схему до джерела живлення, зняти показники вольтметра і всіх амперметрів.
4. Переконалися в правильності першого закону Кірхгофа.
5. Обчислити опір і провідність кожного приймача і всього кола. Записати результати в табл. 1.
6. Повторити п.п. 3-5 при живленні від джерела змінного струму.
7. Скласти звіт про виконану роботу.

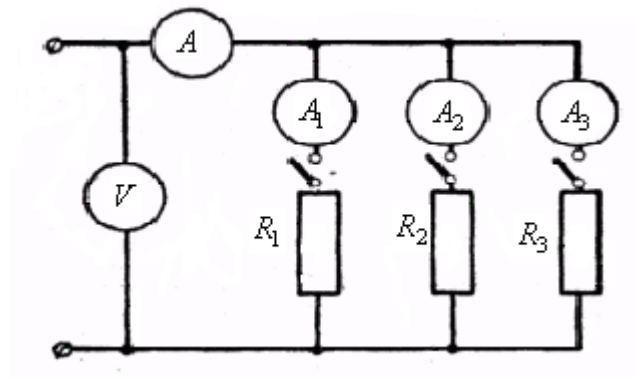


Рисунок 2 - Схема для вивчення паралельного з'єднання приймачів електричної енергії (перший закон Кірхгофа)

Таблиця 1 - Таблиця результатів експериментів

| Результати експериментів          | Номер елементу |   |   |
|-----------------------------------|----------------|---|---|
|                                   | 1              | 2 | 3 |
| Струм у колі елемента – $I$ , А   |                |   |   |
| Струм у загальному колі – $I$ , А |                |   |   |
| Напруга живлення – $U$ , В        |                |   |   |
| Опір елемента – $R$ , Ом          |                |   |   |

|                                  |  |  |  |
|----------------------------------|--|--|--|
| Провідність елемента – $g$ , Сім |  |  |  |
| Споживча потужність – $P$ , Вт   |  |  |  |

## 1.2 Другий закон Кірхгофа

**Мета роботи.** Здійснити послідовне з'єднання приймачів і джерел електроенергії. Визначити падіння напруги на окремих приймачах і загальний струм у колі; переконатися в правильності другого закону Кірхгофа.

**Пояснення.** З'єднання, при якому частина приймачів електричної енергії включені послідовно, а частина паралельно називається змішаним. У цьому випадку можуть бути виділені контури, що представляють замкнуту послідовність приймачів і джерел (рис. 5). Відповідно до другого закону Кірхгофа, алгебраїчна сума падінь напруг і напруг джерел у контурі дорівнює нулю, при будь-якому напрямі протікання струму по контурі.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою вимірювання і приладами.
2. Зібрати схему вимірювання (рис. 3) і перевірити правильність включення всіх приладів.
3. Підключити схему до джерел живлення, виміряти падіння напруги на кожному елементі контуру за допомогою вольтметра, данні записати в табл. 4.
4. Просумувати отримані величини і переконатися в правильності другого закону Кірхгофа.
5. Скласти звіт про виконану роботу.

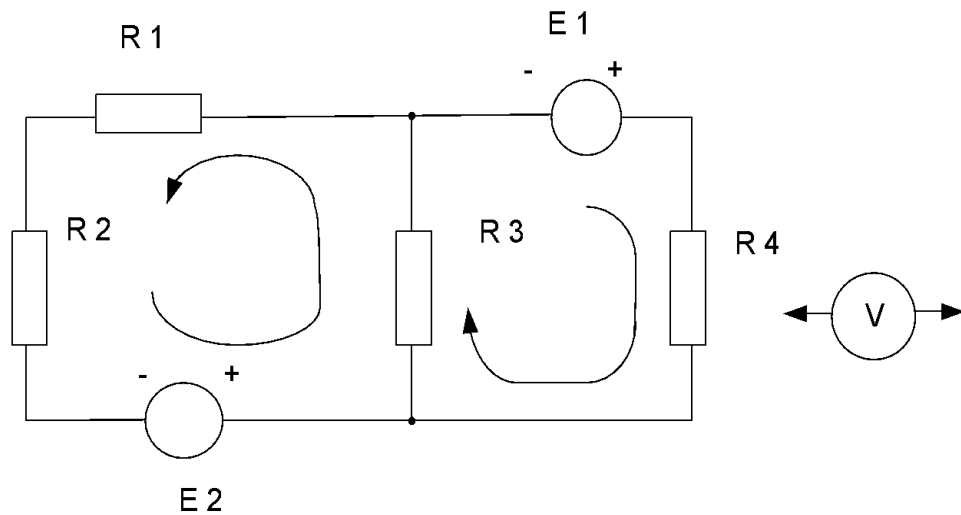


Рисунок 3 – Схема для вивчення дії другого закону Кірхгофа

Табл. 2 - Таблиця результатів експериментів

|                                    | Спадання напруги на $i$ -тому елементі, В |  |  |  |  |  |
|------------------------------------|-------------------------------------------|--|--|--|--|--|
| Елемент                            |                                           |  |  |  |  |  |
| Виміряна напруга<br>– $U_i$ , В    |                                           |  |  |  |  |  |
| Сумарна напруга першого контуру, В | $UR_1 + UR_2 + UR_3 + UE_2 =$             |  |  |  |  |  |
| Сумарна напруга другого            |                                           |  |  |  |  |  |

|                                           |                                      |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|
| контуру, В                                | $UR_3 + UR_4 + UE_1 =$               |
| Сумарна<br>напруга третього<br>контуру, В | $UR_1 + UR_2 + UR_4 + UE_1 + UE_2 =$ |

*Зміст звіту*

1. Назва лабораторної роботи.
2. Технічні дані електровимірювальних приладів та устаткування, що використовуються для проведення даної лабораторної роботи.
3. Електричні схеми вимірювання.
4. Табл. 3 і табл. 4 з виміряними і обчисленими величинами.
5. Формула для визначення опору паралельно з'єднаних приймачів.
6. Формула для визначення провідності окремого приймача і паралельно з'єднаних приймачів.
7. Формула для визначення потужності споживаної приймачами електричної енергії.
8. Висновки по роботі.

### **Контрольні запитання**

1. Сформулюйте закон, на основі якого за показаннями амперметра і вольтметра визначають омичний опір?
2. В яких одиницях вимірюється сила струму, напруга й омичний опір?
3. Що таке ампер, вольт, ом?
4. Яка точність виміру омичного опору при максимальних похибках приладів, які використовуються в роботі?

5. Чому дорівнює падіння напруги на навантаженні, опір якої  $R$  (Ом), якщо через нього проходить струм  $I$  (А)?
6. Чому дорівнює напруга на входних затисненнях послідовного кола, якщо відоме падіння напруги на окремих її елементах?
7. Чому дорівнює струм у послідовному ланцюзі, якщо відомі струми в окремих її елементах?
8. Чому дорівнює споживана потужність послідовного кола, якщо відомі потужності споживані елементами?
9. Чому провідник чинить опір електричному струму?
10. Що таке провідність приймача струму, в яких одиницях вона вимірюється?
11. Чому дорівнює провідність паралельно з'єднаних приймачів, якщо опір кожного з них дорівнює  $R$ ? Чому дорівнює опір такого кола?
12. Як розподіляється струм по опорах, з'єднаних паралельно, якщо загальний струм у ланцюзі  $I$ , число опорів  $n$ , величина кожного опору  $R$ ?
13. Сформулюйте перший закон Кірхгофа?
14. Сформулюйте другий закон Кірхгофа?
15. Чому дорівнює струм в окремій гілці кола, якщо падіння напруг на ній дорівнює  $U$ , а опір дорівнює  $R$ ?
16. Як пов'язати закони Кірхгофа з законом збереження енергії?
17. Чому дорівнює напруга на входних затисненнях паралельного кола?
18. Чому дорівнює струм у паралельному ланцюзі, якщо відомі струми в окремих її елементах?
19. Чому дорівнює споживана потужність паралельного кола, якщо відомі потужності споживані елементами?

**Лабораторна робота № 2**  
**«Резистори, конденсатори, котушки індуктивності в кола змінного струму. Трикутники опорів і провідності.»**

**2.1 Дослідження електричного кола змінного струму з активним і індуктивним опорами**

**Мета роботи.** Ознайомитися з найпростішими колами змінного струму, що мають активні й індуктивні опори, виміряти величини струмів і напруг на окремих ділянках кола і порівняти їхню фазу.

**Завдання на підготовку до лабораторної роботи.**

В результаті вивчення теоретичного матеріалу студент повинен

**знати:**

- основні характеристики змінного електричного струму;
- властивості резисторів і реактивних елементів при живленні змінним струмом;
- порядок побудови трикутників опорів;
- правила безпеки при роботі в лабораторії;

**вміти:**

- збирати електричні кола змінного струму;
- робити електричні вимірювання за допомогою осцилографа;
- обчислювати значення параметрів електричного кола за результатами вимірювань.

**Пояснення.** Струм, який періодично змінюється за величиною і напрямом, називають змінним. Синусоїдальним змінним струмом називається струм, величина якого в часі змінюється за законом синуса:

$$i = I_m \sin 2\pi ft,$$

де  $I_m$  - амплітуда змінного струму (максимальне значення), А;

$f$  - частота змінного струму, Гц;

$t$  - час, сек.

Зазвичай в техніці мають справу із синусоїдальним змінним струмом, тому такий струм часто називають просто змінним. Змінний струм, проходячи через котушку індуктивності, утворює навколо неї змінне магнітне поле, що наводить у котушці е. р. с. (електрорушійну силу) самоіндукції, протилежно спрямовану прикладеній напрузі. Таким чином, індуктивність кола змінного струму впливає на силу струму як опір. Відповідна розрахункова величина називається індуктивним опором; вона позначається  $X_L$  і вимірюється в омах.

Чим вища частота змінного струму, тим більша е. р. с. самоіндукції і тим більший індуктивний опір  $X_L$ . Індуктивний опір дорівнює:

$$X_L = 2\pi fL.$$

Оскільки е. р. с. самоіндукції виникає тільки при зміні струму, то і максимальні значення е. р. с. настають при максимальній швидкості зміни струму в котушці, тобто при проходженні струму через нуль від позитивного значення до негативного і навпаки — від негативного до позитивного. Тому

е. р. с. самоіндукції за часом відстає від струму на чверть чи період рівно на  $\frac{\pi}{2}$  електричних радіани. Напруга на котушці, будучи протилежною е. р. с., навпаки, випереджає струм на чверть чи періоду на  $\frac{\pi}{2}$  радіани. Якщо по котушці проходить синусоїдальний струм, то напруга, що діє на ній буде:

$$u_L = 2\pi f L I_m' \sin(2\pi f t + \frac{\pi}{2}),$$

де  $u_L$  - миттєве значення напруги на індуктивності.

Величина  $\omega = 2\pi f$  називається кутовою частотою змінного струму і вимірюється в радіанах за секунду.

При проходженні змінного струму по ланцюзі, що складається з послідовно включених активного й індуктивного опорів (рис. 1), між входними затисненнями кожного з цих елементів діє змінна синусоїдальна напруга.

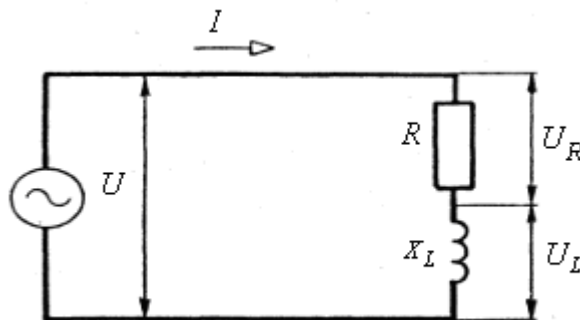


Рисунок 1 – Послідовне з'єднання активного та індуктивного елементів

Напруга, підведена до активного опору по фазі збігається зі струмом. На індуктивному опорі миттєве значення напруги

$$u_L = \omega L I_m' \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

Ця напруга по фазі випереджає струм на  $\frac{\pi}{2}$  радіани.

Сума миттєвих значень напруг, що діють на елементах, дорівнює миттєвому значенню вхідної напруги, підведеної до всього кола:

$$u = u_a + u_L = r I_m' \sin \omega t + \omega L I_m' \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$u = z I_m' \sin(\omega t + \varphi)$$

Напруга на затисненнях активного опору, коли через нього проходить змінний синусоїдальний струм, збігається по фазі з цим струмом, тобто струм одночасно з напругою досягає максимального значення і проходить нульові значення (рис. 2).

Коли ж змінний синусоїдальний струм проходить через чисто індуктивний опір, то на затисненнях опір випереджає по фазі цей струм на  $\frac{\pi}{2}$  радіани, тобто коли напруга, змінюючись синусоїдально, досягає максимуму, струм у цей миттєвий час дорівнює нулю (рис. 3).

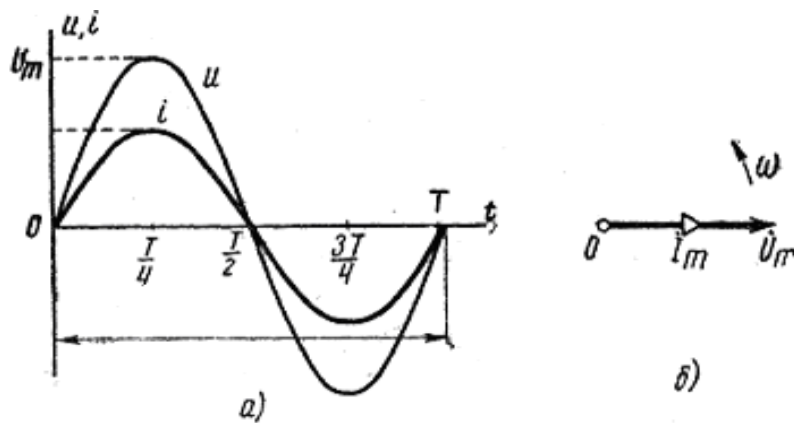


Рисунок 2 - Епюри напруги і струму на чисто активному опорі:  
а) – синусоїдальні криві миттєвих значень; б) – векторна діаграма

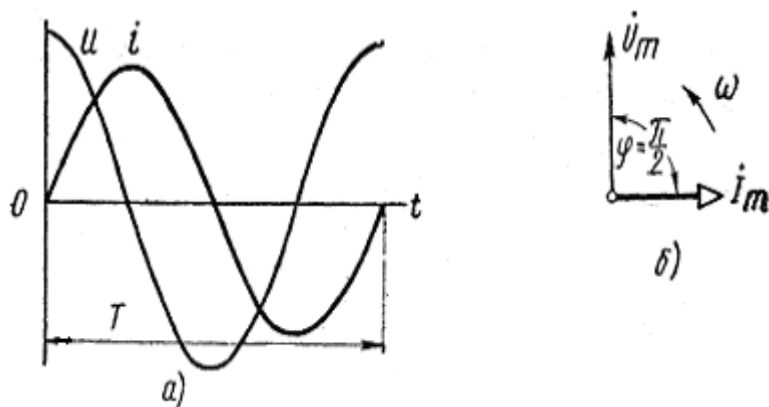


Рисунок 3 – Співвідношення напруги і струму на індуктивному опорі:  
а) – синусоїдальні криві миттєвих значень; б) – векторна діаграма

Електричний ланцюг, по якому проходить змінний струм споживає з мережі активну, реактивну і повну потужності. Повна потужність, вимірювана у вольт-амперах ( $ВА$ ), дорівнює добутку струму  $I$  на напругу  $U$  :

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

Активна потужність  $P$ , вимірюється у ватах, дорівнює добутку напруги  $U$  на струм  $I$  і на коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$ , або добутку квадрата струму на активний опір:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R .$$

Реактивна потужність  $Q$ , вимірювана у вольт-амперах реактивних (*вар*), дорівнює добутку напруги  $U$  на струм  $I$  і на синус кута зрушення фаз між прикладеною напругою і струмом  $\sin \varphi$ , або добутку квадрата струму на реактивний опір:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 x_L .$$

Співвідношення цих потужностей між собою представлені на рис. 4, вони утворюють трикутник потужностей.

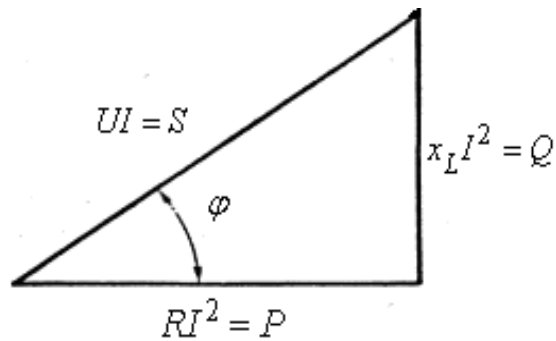


Рисунок 4 – Трикутник потужностей

При проведенні лабораторних робіт потрібно мати на увазі, що індуктивний опір являє собою котушку, намотану з провідника, а будь-який провідник має активний опір і тому індуктивний опір у чистому виді виконати дуже важко.

Реальна індуктивна котушка завжди має активний опір; таким чином, повний опір котушки визначається за формулою:

$$z = \sqrt{R^2 + x_L^2}$$

### *Устаткування та апаратура*

Двохпроменевий осцилограф, вольтметр змінного струму 0-30 В; амперметр змінного струму 0 – 1 А, конденсатори, котушки індуктивності, комплект з'єднуючих проводів.

## Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис. 5).

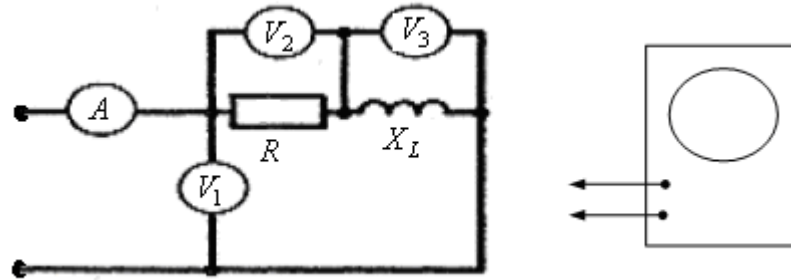


Рисунок 5 – Схема електричних вимірювань

активно-індуктивного кола

2. Подати живлення на схему і виміряти напруги на активному й індуктивному опорі.

Результати вимірювань записати в табл. 1.

Таблиця 1 - Таблиця результатів експериментів

|                               | Активний<br>опір | Індуктивний<br>опір | Вхідні<br>клеми |
|-------------------------------|------------------|---------------------|-----------------|
| Напруга на елементі – $U$ , В |                  |                     |                 |
| Струм у колі – $I$ , А        |                  |                     |                 |
| Величина опору – $R$ , Ом     |                  |                     |                 |

|                                 |  |  |  |
|---------------------------------|--|--|--|
| Споживана потужність – $P$ , Вт |  |  |  |
|---------------------------------|--|--|--|

**Примітка.** Регулювання сили струму можна робити потенціометром, "Вихід" на джерелі змінного струму.

3. Обчислити за результатами вимірювання сили струму, напруги, опори і потужності.

4. За результатами обчислень побудувати трикутник опорів.

5. Обчислити значення коефіцієнта потужності.

6. Побудувати трикутник потужностей.

7. За допомогою двопробного осцилографа зняти епюри напруг на активному і реактивному опорі і визначити різницю їх початкових фаз.

## **2.2 Дослідження електричного кола змінного струму з активним і ємнісним опорами**

Повторити усі вимірювання і розрахунки для випадку, коли замість котушки індуктивності в схему на рис. 10 включена ємність. Порівняти отримані результати.

### *Зміст звіту*

1. Назва лабораторної роботи.
2. Технічні дані електровимірювальних приладів і устаткування, які необхідні для виконання даної лабораторної роботи.
3. Електрична схема вимірювання.
4. Таблиці з виміряними й обчисленими величинами.
5. Формули для розрахунку повного опору кола, повної потужності, активної і реактивної потужності, коефіцієнта потужності.

6. Трикутники напруг, опорів і потужностей.
7. Осцилограми напруг на резисторах і реактивних опорах.
8. Порівняльна оцінка зрушення фази між струмом і напругою для реактивного опору різного виду (індуктивного і ємнісного).
9. Висновки по роботі.

### ***Контрольні запитання***

1. Який струм називається синусоїдальним змінним струмом?
2. Чому дорівнює реактивний опір індуктивності?
3. Чому дорівнює реактивний опір ємності?
4. Чому дорівнює миттєва напруга на індуктивності і на активному опорі, якщо по них протікає змінний струм?
5. Чому дорівнює кутова частота? В яких одиницях вона вимірюється?
6. Чому дорівнюють діючі значення синусоїдальних струмів і напруг?
7. Що таке активна і реактивна потужності однофазного кола змінного струму?
8. Чому дорівнює повна потужність однофазного кола змінного струму?
9. Що таке коефіцієнт потужності?
10. Чому дорівнює активна потужність кола змінного струму, якщо коефіцієнт потужності дорівнює одиниці?
11. Чому дорівнює реактивна потужність кола змінного струму, якщо коефіцієнт потужності дорівнює одиниці?
12. Чому дорівнює активна потужність кола змінного струму, якщо коефіцієнт потужності дорівнює нулю?
13. Чому дорівнює реактивна потужність кола змінного струму, якщо коефіцієнт потужності дорівнює нулю?

## Лабораторна робота №3

### Резонансні явища в колах змінного струму.

#### 3.1 Дослідження резонансного контуру

Пояснення. У практиці електротехніки часто використовується явище резонансу коливального контуру, що складається з ємності конденсатора та індуктивності котушки. В електронних пристроях резонанс виникає на певній частоті, коли індуктивна та ємнісна складові реакції системи врівноважені, що дозволяє енергії циркулювати між магнітним полем індуктивного елемента та електричним полем конденсатора.

Механізм резонансу полягає в тому, що магнітне поле індуктивності генерує електричний струм, що заряджає конденсатор, а розрядка конденсатора створює магнітне поле в індуктивності процес, який повторюється багаторазово, за аналогією з механічним маятником.

Електричний пристрій, що складається з ємності та індуктивності, називається коливальним контуром. Елементи коливального контуру можуть бути включені як послідовно, і паралельно. При досягненні резонансу імпеданс послідовно з'єднаних індуктивності та ємності мінімальний, а при паралельному включенні — максимальний.

Частота, де відбувається резонанс, визначається величинами використовуваних елементів. В той же час, резонанс може бути шкідливий, якщо він виникає в несподіваному місці через пошкодження, недостатньо якісного проектування або виробництва електронного пристрою. Такий резонанс може викликати паразитний шум, спотворення сигналу і навіть пошкодження компонентів.

Прийнявши, що в момент резонансу індуктивна та ємнісна складові імпедансу рівні, резонансну частоту можна знайти з вираження  $\omega L = 1/\omega C$  де  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  - Резонансна частота в герцах;  $L$  - індуктивність у генрі;  $C$  - ємність

у фарадах. Формула визначення резонансної частоти як послідовного і паралельного контурів називається формулою Томсона і має вигляд

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}.$$

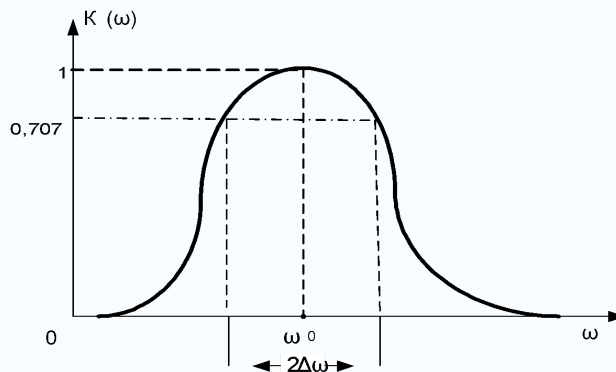


Рис.3.5 – Типова крива резонансна коливального контуру.

Ширина смуги пропускання  $2\Delta\omega$  визначається добротністю коливального контуру, чим добротність вище, тим смуга вже (величина  $2\Delta\omega$  менше) і тим крутіше схили резонансної кривої. Теоретично резонансна крива повинна мати «П-подібну» форму. Насправді резонансна крива зазвичай має колоколообразную форму, представлену на Рис. 3.5. Смуга пропускання  $2\Delta\omega$  визначається, як і для фільтрів лише на рівні 0,707.

### Порядок виконання роботи

1. Для конденсатора і котушки індуктивності розрахувати частоту резонансу  $\omega_0$ .
2. Зібрати схему послідовного коливального контуру, наведену на Рис.3.6.

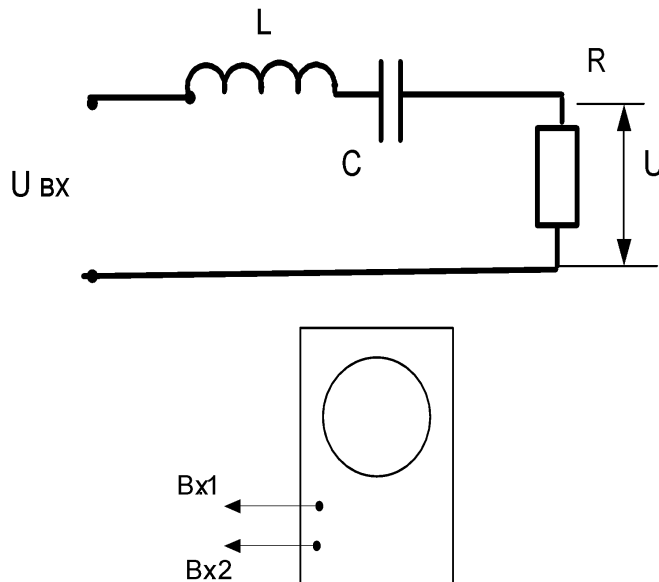


Рис.3.6 – Схема електричних вимірів коливального контуру.

3. Підключити Вхід 1 осцилографа і генератор синусоїдальних коливань до входу фільтра, встановити і підтримувати по екрану осцилографа протягом всіх вимірювань амплітуду вихідної напруги постійного генератора, наприклад 1В.
4. Підключити Вхід 2 осцилограф паралельно характеристичного опору і по екрану виміряти амплітуду вихідної напруги, змінюючи частоту генератора від мінімуму до максимуму, фіксувати амплітуду вихідної напруги, дані занести в таблицю виду Табл.3.1.
5. За даними табл.3.1 розрахувати величину відносного коефіцієнта передачі контуру, побудувати графік залежності  $K_0(\omega)$ , визначити за графіком смугу пропускання коливального контуру.

### Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.
2. Технічні дані електровимірювальних приладів та обладнання, що використовуються під час виконання даної лабораторної роботи.
3. Електрична схема вимірів.
4. Таблиці з виміряними та обчисленими величинами.

5. Графіки передавальних характеристик фільтрів та контурів.
6. Висновки щодо роботи.

***Відповісти усно на такі запитання***

1. Що таке смуга пропускання контура?
2. Що таке коливальний контур?
3. Які бувають коливальні контури?
4. Де застосовуються коливальні контури?
5. Як визначається смуга пропускання контуру?
6. Як впливає добротність на смугу пропускання контуру?
7. Який характер має імпеданс контуру на резонансній частоті?

**Лабораторна робота №4**

**Дослідження роботи однофазного трансформатора. Коефіцієнт трансформації.**

**Мета роботи :** Вивчити принцип дії електротехнічного пристрою - трансформатор і його основні характеристики.

**Короткі відомості з теорії трансформатора**

Трансформатор це електротехнічний пристрій, призначений для зміни параметрів (величини напруги і струмів) електричної енергії.

Трансформатор складається (рис. 1) з сердечника і розміщених на нім обмоток первинною і вторинною ( вторинних обмоток може бути декілька).

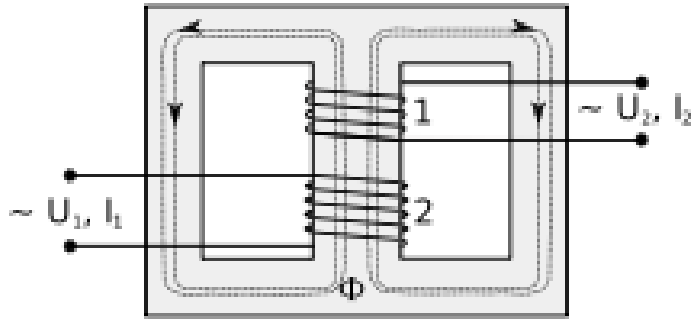


Рисунок 1 - Схематичне облаштування трансформатора:

1 - первинна обмотка, 2 - вторинна обмотка.

Робота трансформатора ґрунтована на двох базових принципах:

1. Електричний струм, що змінюється в часі, створює магнітне поле (електромагнетизм), що змінюється в часі.
2. Зміна магнітного потоку, що проходить через обмотку, створює ЕРС в цій обмотці (електромагнітна індукція).

На одну з обмоток, що називається первинною обмоткою, подається напруга від зовнішнього джерела. Змінний струм, що протікає по первинній обмотці, створює змінний магнітний потік в магнітопроводі. В результаті електромагнітної індукції, змінний магнітний потік в магнітопроводі створює в усіх обмотках, у тому числі і в первинній, ЕРС (електрорушійна сила) індукції, пропорційну першій похідній магнітного потоку, при синусоїдальному струмі зрушеної на  $90^\circ$  у зворотний бік по відношенню до магнітного потоку.

Простий силовий трансформатор складається з магнітопроводу - сердечника, виконаного з феромагнітного матеріалу (зазвичай листова електротехнічна сталь) і двох обмоток (катушок), розташованих на стержнях магнітопроводу. Одна з обмоток приєднана до джерела змінного струму на напругу  $U_1$ , цю обмотку називають первинною. До іншої обмотки підключений споживач  $Z_n$  - її називають вторинною.

Дія трансформатора ґрунтована на явищі електромагнітної індукції. При підключенні первинної обмотки до джерела змінного струму у витках цієї обмотки протікає змінний струм  $i_1$ , який створює в магнітопроводі змінний магнітний потік  $\Phi$ . Замикаючись на магнітопроводі, цей потік

зчіплюється з обома обмотками (первинною і вторинною) і індукує в них ЕРС:

$$e_1 = - N_1 (d\Phi/dt); \quad (1)$$

$$e_2 = - N_2 (d\Phi/dt); \quad (2)$$

де  $N_1$  і  $N_2$ , - число витків в первинній і вторинній обмотках трансформатора.

При підключенні навантаження  $Z_n$  до виведень вторинної обмотки трансформатора під дією ЕРС  $e_2$  в ланцюзі цієї обмотки створюється струм  $i_2$ , а на виведеннях вторинної обмотки встановлюється напруга  $U_2$ . У трансформаторах  $U_2$ , що підвищують  $> U_1$ , а в тих, що знижують -  $U_1 < U_2$ .

З формул (1) і (2) витікає, що ЕДС  $e_1$  і  $e_2$ , відрізняються один від одного числом витків обмоток, в яких вони наводяться. Тому, застосовуючи обмотки з необхідним співвідношенням витків, можна виготовити трансформатор на будь-яке відношення напруги.

Трансформатори мають властивість оборотності; один і той же трансформатор можна використати в якості того, що підвищує і знижує. Але зазвичай трансформатор має певне призначення: або він є таким, що підвищує, або що знижує.

Трансформатор - це апарат змінного струму. Якщо ж його первинну обмотку підключити до джерела постійного струму, то магнітний потік в магнітопроводі трансформатора також буде постійним як за величиною, так і по напрямку ( $d\Phi/dt = 0$ ). Тому і в обмотках трансформатора не буде наводиться ЕДС.

### **Режим холостого ходу**

Коли вторинні обмотки ні до чого не підключені (режим холостого ходу), ЕДС індукції в первинній обмотці практично повністю компенсує напруга джерела живлення, тому струм через первинну обмотку невеликий. Для трансформатора з сердечником з магнітом'якого матеріалу (наприклад, з

трансформаторної сталі) струм холостого ходу характеризує величину втрат в сердечнику на вихрові струми і на гістерезис. Потужність втрат можна вичислити помноживши струм холостого ходу на напругу, що подається на трансформатор. Напруга на вторинній обмотці в першому наближенні визначається законом Фарадея.

### Закон Фарадея

ЕРС, створювана у вторинній обмотці, може бути вчислена за законом Фарадея, який свідчить, що:

$$U_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

де:  $U_2$  - напруга на вторинній обмотці,

$N_2$  - число витків в вторинній обмотці,

$\Phi$  - сумарний магнітний потік, через один виток обмотки. Якщо витки обмотки розташовані перпендикулярно лініям магнітного поля, то потік буде пропорційний магнітному полю  $B$  та площі  $S$  через яку він проходить.

ЕДС, створювана в первинній обмотці, відповідно:

$$U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

де:  $U_1$  - миттєве значення напруги на кінцях первинної обмотки,

$N_1$  - число витків в первинній обмотці.

Поділивши рівняння  $U_2$  на  $U_1$ , отримаємо відношення:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

### Режим короткого замикання

У режимі короткого замикання, на первинну обмотку трансформатора подається змінна напруга невеликої величини, виведення вторинної обмотки сполучають накоротко. Величину напруги на вході встановлюють такою, щоб струм короткого замикання дорівнював номінальному (розрахунковому) струму трансформатора. У таких умовах величина напруги короткого замикання характеризує втрати в обмотках трансформатора, втрати на

омічному опорі. Потужність втрат можна вичислити помноживши напругу короткого замикання на струм короткого замикання. Цей режим широко використовується у вимірювальних трансформаторах струму.

### **Режим з навантаженням**

При підключенні навантаження до вторинної обмотки у вторинному колі виникає струм, що створює магнітний потік в магнітопроводі, спрямований протилежно магнітному потоку, що створюється первинною обмоткою. В результаті в первинному колі порушується рівність ЕРС індукції і ЕРС джерела живлення, що призводить до збільшення струму в первинній обмотці до тих пір, поки магнітний потік не досягне практично колишнього значення.

Схемний, процес перетворення можна зображувати таким чином:

$$U_1 \rightarrow I_1 \rightarrow I_1 \cdot N_1 \rightarrow \varepsilon_2 \rightarrow I_2$$

Миттєвий магнітний потік в магнітопроводі трансформатора визначається інтегралом за часом від миттєвого значення ЕРС в первинній обмотці і у разі синусоїдальної напруги зрушає по фазі на  $90^\circ$  по відношенню до ЕРС. Наведена у вторинних обмотках ЕРС пропорційна першій похідній від магнітного потоку і для будь-якої форми струму співпадає по фазі і формі з ЕРС в первинній обмотці.

### **Рівняння ідеального трансформатора**

Ідеальний трансформатор - трансформатор, у якого відсутні втрати енергії на нагрів обмоток і потоки розсіювання обмоток. У ідеальному трансформаторі усі силові лінії проходять через усі витки обох обмоток, і оскільки магнітне поле, що змінюється, породжує одну і ту ж ЕРС в кожному витку, сумарна ЕРС, індукована в обмотці, пропорційна повному числу її витків. Такий трансформатор усю енергію, що поступає, з первинного кола трансформує в магнітне поле і, потім, в енергію вторинного кола. Енергія, що в цьому випадку поступає, рівна перетвореній енергії.

$$P_1 = I_1 \cdot U_1 = P_2 = I_2 \cdot U_2,$$

де:  $P_1$  - миттєве значення потужності, що поступає на трансформатор, поступає з первинного кола,

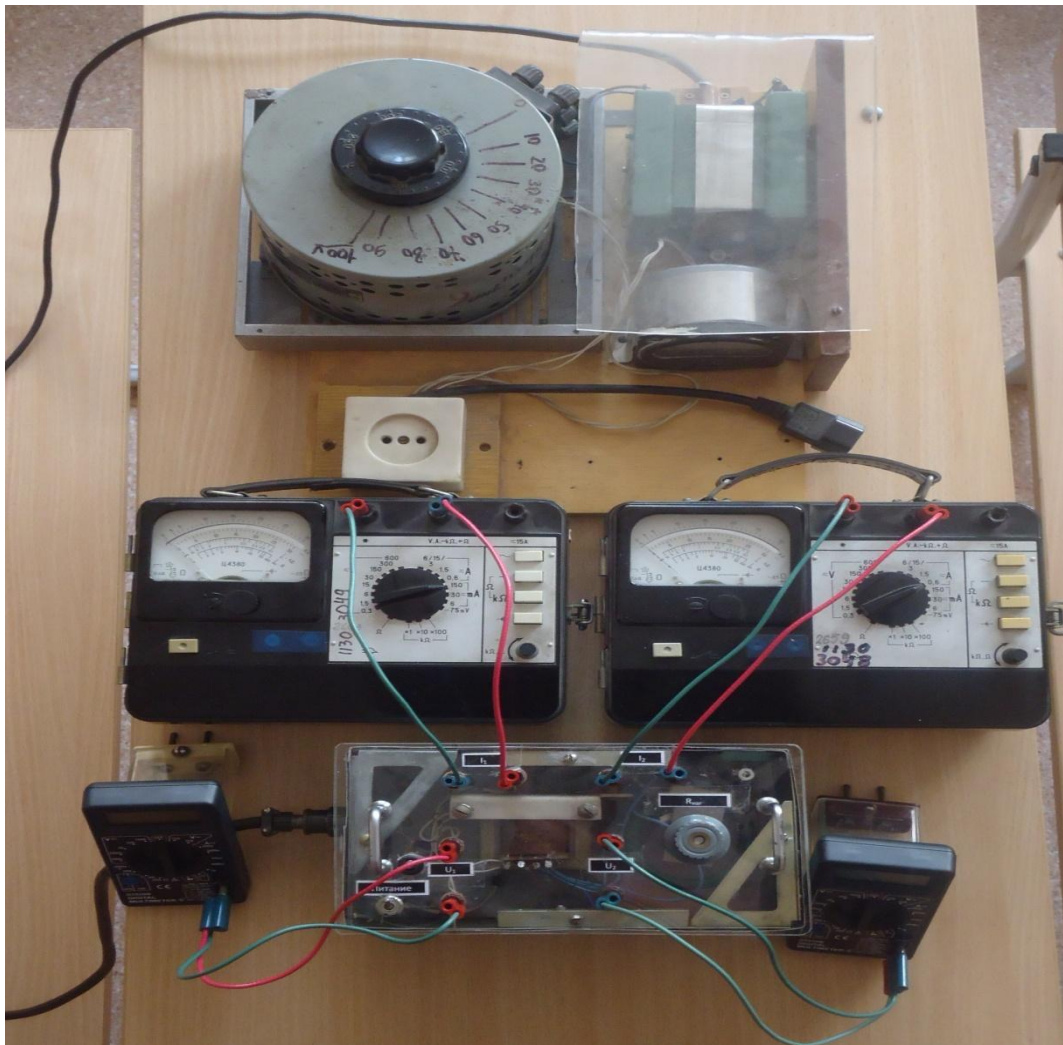
$P_2$  - миттєве значення перетвореної трансформатором потужності, що поступає у вторинне коло.

З'єднавши це рівняння з відношенням напруги на кінцях обмоток, отримаємо рівняння ідеального трансформатора:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}.$$

Таким чином отримуємо, що при збільшенні напруги на кінцях вторинної обмотки  $U_2$ , зменшується струм вторинного кола  $I_2$ .

Для перетворення опору одного кола до опору інший, треба помножити величину на квадрат відношення. Наприклад, опір  $Z_2$  підключений до кінців вторинної обмотки, його приведені значення до первинного кола буде:



### **Правила безпеки при виконанні роботи**

Усі пункти лабораторної роботи виконуються на спеціальній установці, конструкція якої унеможливує дотик студента до оголених струмопровідних частин. Проте, при роботі слід дотримуватися наступних правил:

1. Перед першим включенням зібраної установки необхідно звернутися до викладача (інженера лабораторії) з проханням: перевірити правильність усіх підключень і отримати дозвіл на подання живлення на установку;
2. Забороняється в процесі роботи змінювати схему, виконувати додаткові підключення елементів або вимірювальних приладів при включеному живленні; у разі потреби, потрібно зняти живлення, зробити перекомутацію і виконати п. 1.

### **Порядок виконання роботи**

1. Зібрати схему лабораторної установки приведеною на рис. 4 для проведення вимірів в процесі виконання лабораторної роботи. Перевірити правильність зібраної схеми лабораторної установки:

- кола подання живлення (регулювання напруги має бути поставлене в положення мінімального рівня);
- підключення вимірювальних приладів (вольтметри паралельно елементу на якому вимірюється напруга, амперметри послідовно в колі в якій вимірюється струм);
- підключення навантаження (навантаження має бути включене на максимальний опір);
- повідомити викладачу (інженерів лабораторії) про готовність до проведення вимірів і отримати дозвіл на включення лабораторної установки.

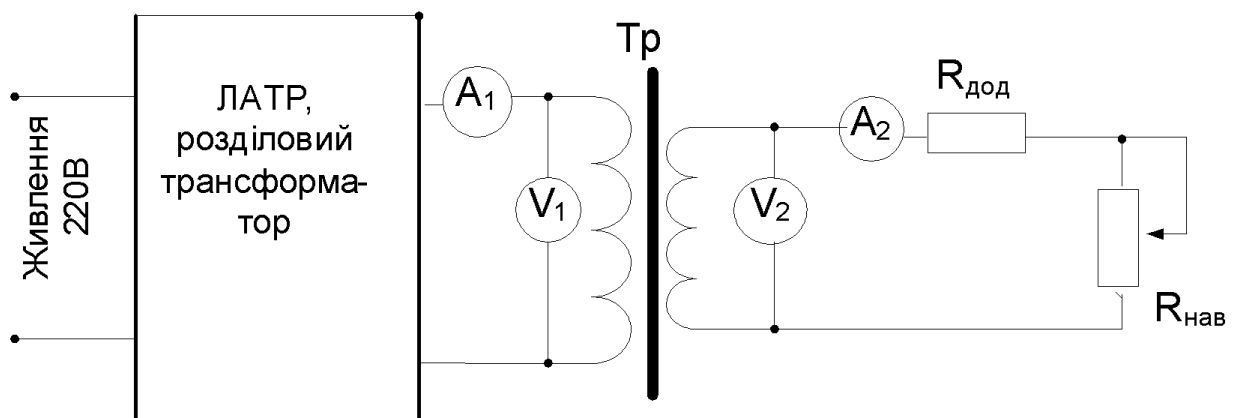


Рисунок 4 - Схема лабораторної установки для дослідження трансформатора

2. Ввімкнути живлення:

- вставить вилку шнура живлення установки в розетку лабораторного трансформатора;
- тумблер "Питание" поставити в положення "Вкл", повинна запалитися сигнальна лампочка.

3. Дослідження трансформатора в режимі холостого ходу (XX), визначення коефіцієнта трансформації:

- при відключеному навантаженні трансформатора, амперметр  $I_2$  відключений від відповідних гнізд, починаючи з мінімальної напруги на первинній обмотці ( $U_1 = 150\text{В}$ ) вимірювати напругу на виході вторинної обмотки  $U_2$ , поступово покроково (крок рівний  $10\text{В}$ ) підвищуючи його за допомогою ЛАТРа, результат занести в табл. 1.

За результатами вимірів розрахувати значення коефіцієнта трансформації при  $i$  - вимірі:

$$K_{mp.i} = U_{вих.i} / U_{вх.i}$$

Таблиця 1- Визначення коефіцієнта трансформації трансформатора

| Параметри                                   | Номер вимірювання |            |     |             |     |               |             |
|---------------------------------------------|-------------------|------------|-----|-------------|-----|---------------|-------------|
|                                             | 1                 | 2          | ... | $i$         | ... | $n-1$         | $n$         |
| Напруга на первинній обмотці, $U_{вх}$ , В  | $U_{вх1}$         | $U_{вх2}$  | ... | $U_{вх i}$  | ... | $U_{вх n-1}$  | $U_{вх n}$  |
| Напруга на вторинній обмотці, $U_{вих}$ , В | $U_{вих1}$        | $U_{вих2}$ | ... | $U_{вих i}$ | ... | $U_{вих n-1}$ | $U_{вих n}$ |
| Розрахункове значення, $K_{mp i}$           | $K_{mp 1}$        | $K_{mp 2}$ | ... | $K_{mp i}$  | ... | $K_{mp n-1}$  | $K_{mp n}$  |
| Середнє значення $K_{mp cp}$                |                   |            |     |             |     |               |             |

Та визначити середнє значення коефіцієнта трансформації:

$$K_{mp cp} = \Sigma K_{mp i} / n; \text{ підсумовування від } I = 1 \dots n,$$

де  $K_{mpi}$  – значення коефіцієнта трансформації отримане при  $i$ -ом вимірюванні;

$n$  – загальна кількість вимірювань.

4. Зняття зовнішньої характеристики трансформатора:

- подати на первинну обмотку від ЛАТРа номінальну напругу  $U_1=200\text{В}$ , надалі підтримувати це значення за допомогою регулювання на ЛАТРі;

- поступово збільшуючи навантаження (зменшуючи опір реостата  $R_{наг}$ ) фіксувати струм  $I_2$  і напруга на вторинній обмотці  $U_2$ , результат занести в табл. 2 (в перший і третій рядки, відповідно)

4. Зняття зовнішньої характеристики трансформатора:

- подати на первинну обмотку від ЛАТРа номінальну напругу  $U_1=200V$ , надалі підтримувати це значення за допомогою регулювання на ЛАТРі;
- поступово збільшуючи навантаження (зменшуючи опір реостата  $R_{наг}$ ) фіксувати струм  $I_2$  і напруга на вторинній обмотці  $U_2$ , результат занести в табл. 2 (в перший і третій рядки, відповідно)

Таблиця 2 - Дані для побудови зовнішньої характеристики трансформатора.

| Параметри                                                         | Номер вимірювання |   |     |     |     |       |     |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------|---|-----|-----|-----|-------|-----|
|                                                                   | 1                 | 2 | ... | $i$ | ... | $n-1$ | $n$ |
| Струм вторинної обмотки, $I_2, A$                                 |                   |   |     |     |     |       |     |
| Коефіцієнт навантаження, $K_n$                                    |                   |   |     |     |     |       |     |
| Напруга на вторинній обмотці, $U_2, V$                            |                   |   |     |     |     |       |     |
| Спад напруги на вторинній обмотці під навантаженням, $\Delta U_2$ |                   |   |     |     |     |       |     |

- по даним таблиці вираховуємо коефіцієнт загрузки:

$$K_n = I_2 / I_{20},$$

де  $I_2$  – поточне значення величини струму в вторинній (перший рядок табл. 2),

$I_{20}$  - номінальне значення струму вторинної обмотки (за вказівкою викладача приймемо  $I_{20} = 900mA$ ).

Отримані результати занести в табл. 2 (другий рядок) - за даними табл. 2 обчислити падіння напруги на вторинній обмотці:

$$\Delta u_2 = E_0 - U_2,$$

де  $E_0$  - напруга на вторинній обмотці при ХХ;

$U_2$  - виміряне значення напруги на вторинній обмотці під навантаженням.

За результатами обчислювань побудувати зовнішню характеристику трансформатора  $U_2 = f(K_n)$ . Приблизний вигляд графіка показано на рис. 5

- зробити висновки.

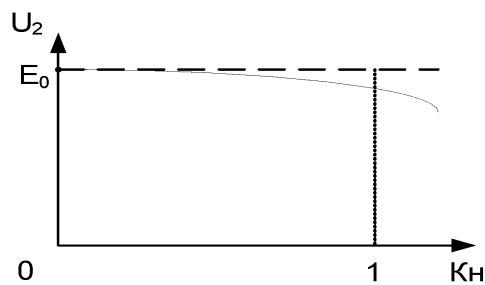


Рисунок 5 - Зовнішня характеристика трансформатора

5. Визначити залежність ККД трансформатора від величини навантаження:

- за допомогою регулювання на ЛАТРе - джерелі живлення встановити номінальну напругу на вході трансформатора -  $U_1 = 200\text{В}$ , значення занести в перший рядок табл. 3, надалі підтримувати це значення за допомогою регулювання на ЛАТРе;

- при початковому положенні движка резистора навантаження ( $R_n$ ) за допомогою приладу Ц4380 ( $A_I$  на рис. 3) виміряти струм в первинній обмотці ( $I_1$ ), значення занести в другий рядок табл. 3;

- за допомогою приладу іншого приладу Ц4380 ( $A_2$  на рис.3) виміряти струм у вторинній обмотці ( $I_2$ ), значення занести в четвертий рядок табл. 3;
- виміряти вихідну напругу трансформатора ( $U_2$ ), значення занести у п'ятий рядок таблиці

Таблиця 3 – Залежність ККД трансформатора від навантаження

| Параметри                            | Номер вимірювання |      |     |     |       |     |
|--------------------------------------|-------------------|------|-----|-----|-------|-----|
|                                      | 1                 | .... | $i$ | ... | $n-1$ | $n$ |
| Вхідна напруга $U_1$ , В             |                   |      |     |     |       |     |
| Струм первинної обмотки $I_1$ , мА   |                   |      |     |     |       |     |
| Споживна потужність $P_1$ , Вт       |                   |      |     |     |       |     |
| Струм вторинної обмотки $I_2$ , мА   |                   |      |     |     |       |     |
| Вихідне навантаження $U_2$ , В       |                   |      |     |     |       |     |
| Потужність в навантаженні $P_2$ , Вт |                   |      |     |     |       |     |
| Розрахункове значення ККД, %         |                   |      |     |     |       |     |

- розрахувати вхідну потужність за формулою та результат занести в третій рядок табл. 3:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1;$$

- розрахувати вихідну потужність за формулою та результат занести в шостий рядок табл. 3:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2;$$

- розрахувати величину коефіцієнта корисної дії по нижче приведеній формулі та результат занести в сьомий рядок табл. 3:

- розрахувати вхідну потужність за формулою та результат занести в третій рядок табл. 3:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1;$$

- розрахувати вихідну потужність за формулою та результат занести в шостий рядок табл. 3:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2;$$

- розрахувати величину коефіцієнта корисної дії по нижче приведеній формулі та результат занести в сьомий рядок табл. 3:

$$\eta = (P_2 / P_1) \cdot 100\%;$$

- за даними таблиці 3 побудувати графік залежності:

$$\eta = f(P_2).$$

Приблизний вигляд графіка наведено на рис. 6.

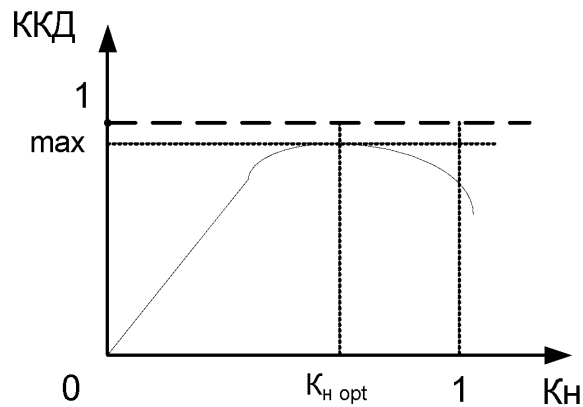


Рисунок 6 - Залежність коефіцієнта корисної дії трансформатора від величини навантаження.

- зробити висновки.

### Зміст звіту

1. На титульному аркуші:
  - назва лабораторної роботи, прізвище, ініціали, група;
  - схема лабораторної установки рис.3 з поясненням.
2. На звороті: перелік виконаних робіт, заповнені таблиці 1, 2, 3 та графіки, побудовані за даними табл. 2 та 3.
3. Висновки за результатами експериментів.

### Запитання для самоперевірки

1. Що таке трансформатор?
2. Які бувають трансформатори за коефіцієнтом трансформації?
3. У чому полягає перетворення параметрів електричної енергії?
4. Які два головні принципи лежать в основі роботи трансформатора?
5. Сформулюйте і поясніть закон Фарадея.
6. Дайте характеристику трьом режимам роботи трансформатора.
7. Приведіть і поясніть рівняння ідеального трансформатора.
8. Як практично визначити коефіцієнт трансформації?
9. Що таке зовнішня характеристика трансформатора?

## Лабораторна робота №5

### Дослідження кола, що диференціює та інтегрує

#### Короткі теоретичні відомості

Постійна часу характеризує швидкість перехідного процесу. За час  $t = \tau$  спадна по експоненті величина зменшується в  $e$  раз (тобто приблизно в 2.7 разів) і досягає 0.37 свого початкового рівня а наростаюча 0.63 значення, що встановилося. Наростаюча величина  $U_C$  при  $\tau=1$  досягає значення 0.63 значення що встановилося, рівного 1. За час  $t=3\tau$  і  $t=5\tau$  вона досягне відповідно, 0.95 і 0.99. Практично перехідний процес вважатимуться закінченим під час  $t = (3 \dots 5)\tau$ .

Аналогічно спадна величина за час  $t=3\tau$  і  $t=5\tau$  досягає, відповідно, 0.05 і 0.01 свого первісного значення. При заряді конденсатора напруга на пластинах конденсатора збільшується до максимальної за експоненційним законом. RC -кола, що визначає швидкість перехідного процесу.

Вводячи за визначенням падіння напруги на опорі  $R$  і ємності  $C$ , і враховуючи зв'язок між ними отримаємо два граничні випадки. Якщо виконується умова:  $UR \ll UC$ , то  $U_{вх} \approx U_C$  та напруга на виході, що знімається з резистора буде

$$UR = \tau (dU_{вх}/dt),$$

Пропорційно похідної від вхідного сигналу, саме коло буде називатис «диференціюючим»

пропорційно похідної від вхідного сигналу, саме коло буде називатис «диференціюючим».

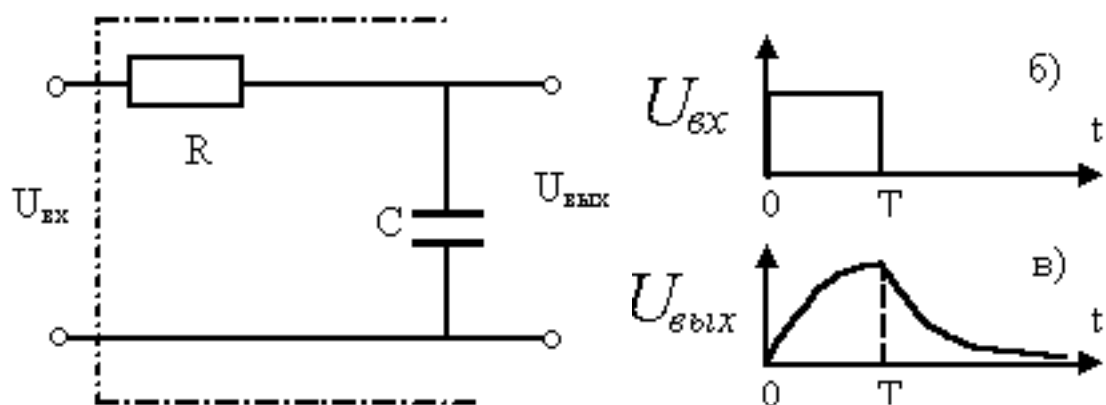
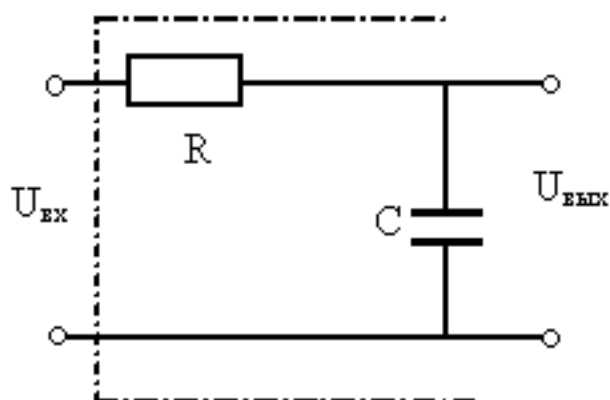
Якщо виконується умова:  $UR \gg UC$ , то  $U_{вх} \approx UR$  і напруга на виході, що знімається з конденсатора буде

$$U_C = 1/T \int i(t) dt$$

пропорційно інтегралу від вхідного сигналу, сам ланцюжок буде називатися «інтегруючим».

Таким чином, можливо два варіанти схем RC-ланцюжків: інтегруюча (рис. 22 а) і диференціююча Рис.1. На цих малюнках наведені епюри, що показують перетворення

вхідного прямокутного імпульсу (рис.22б і рис.23б) при проходженні через ці ланцюжки (рис.22в і рис.23, відповідно).



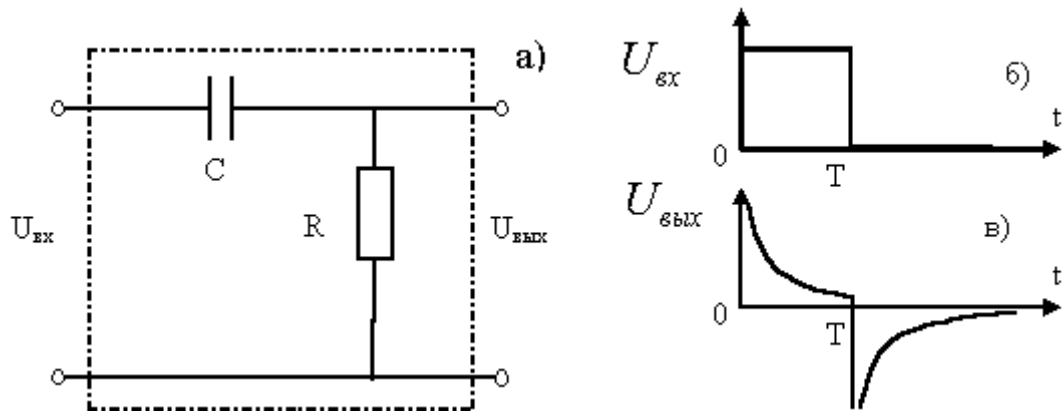
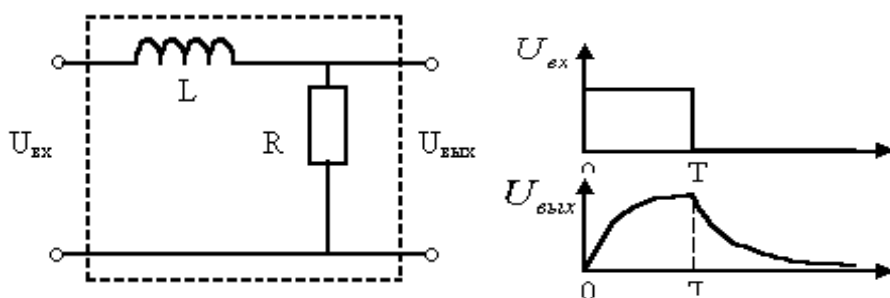


Рисунок. 1 Диференціюючі кола а) принципова схема; б) форма імпульсу на вході; в) форма імпульсу на виході ланцюжка

Сильне впливом геть форму вихідного імпульсу надає співвідношення тривалості імпульсу  $T$  і постійної часу ланцюжка

$\tau = RC$ . Зокрема, для інтегруючого ланцюжка має виконуватися умова  $T \gg \tau$ . Для диференціюючого ланцюжка має бути  $\tau < T$ .

При співвідношенні  $\tau \approx T$  диференціюючий ланцюжок перетворюється на перехідну, яка передає вхідний сигнал на вихід практично не змінюючи його форму. Перехідні ланцюжки використовуються як елементи зв'язки між окремими каскадами, оскільки вони пропускають змінну складову (сигнал) і не пропускають постійну складову (живлення). Цим виключається взаємний вплив каскадів один на одного по постійному струму. Інтегруючі і диференціюючі цепочки можуть бути побудовані і на основі  $RL$  елементів. Їх принципові схеми і вид входних і вихідних імпульсів приведені на рис.24 і 25, відповідно.



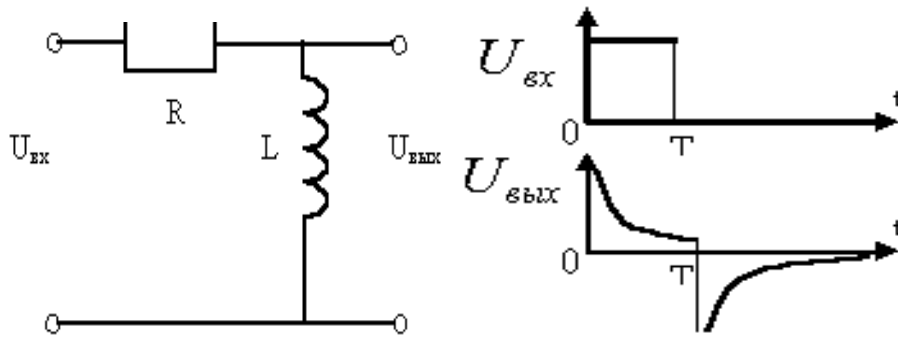


Рисунок. 2. Диференціююча RL-кола

У разі RL -кола постійна часу визначається як відношення індуктивності котушки до опору резистора  $\tau = L / R$ . Насправді більше застосування знаходять RC – кола як прості у виготовленні і мають менші розміри.

Обладнання та апаратура

До експериментальної установки входить: генератор імпульсів прямокутної форми Г 5-54, електронний вольтметр В 7- 34 А двопроменевий осцилограф, джерело постійного струму, магазин опорів, ємностей та індуктивностей зі стенду УІЛЗ.

### Порядок виконання роботи 5.1.

Зняття залежності величини напруги на конденсаторі при заряді та розряді

а)- зібрати схему наведену на рис.20, використовувати номінали елементів за вказівкою викладача;

б) встановити вихідну напругу блока живлення 10 В;

в) приєднати вхід вольтметра до гнізд «Uс» лабораторної установки;

г) поставити ключ у положення «Заряд», натиснути та утримувати кнопку «Скидання»;

д) виміряти вольтметром напругу на конденсаторі, відпустити кнопку «Скидання» і далі проводити відлік значення напруги на конденсаторі через кожні десять секунд, поки воно не прийде до значення, отримані дані занести в таблицю 1;

Табл.1 Напряжение на конденсаторе при заряде и разряде емкости

|                          | $U_c$<br>при $t=0$ | $U_c$<br>при $t=1 \cdot 10$ | $U_c$<br>при $t=2 \cdot 10$ | ... | $U_c$<br>при $t=n \cdot 10$ |
|--------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----|-----------------------------|
| Первый цикл              |                    |                             |                             |     |                             |
| Второй цикл              |                    |                             |                             |     |                             |
| ...                      |                    |                             |                             |     |                             |
| Усредненное<br>по циклам |                    |                             |                             |     |                             |

е) повторить пункт д) три-пять раз, после чего произвести усреднение полученных результатов для каждого момента времени регистрации напряжения и занести в нижнюю строчку таблицы 1;

ж) поставить ключ в положение «Разряд» и повторить пункты д) и е), результаты занести в таблицу 1(не нажимая кнопку «Сброс»);

ж) построить графики полученных зависимостей  $U_C = F(t)$  при заряде и разряде конденсатора, сравнить с расчетными для данной постоянной времени.

## 5.2. Зняття залежності струму через конденсатор при заряді та розряді

а) зібрати схему наведену на рис. використовувати номінали елементів за вказівкою викладача;

б) встановити вихідну напругу блока живлення 10 В;

в) приєднати вхід вольтметра до гнізд «UR» лабораторної установки;

г) поставити ключ у положення «Заряд», натиснути та утримувати кнопку «Скидання»;

д) виміряти вольтметром напругу на резисторі, відпустити кнопку «Скидання» і далі проводити відлік значення напруги на резисторі через кожні десять секунд, поки воно не прийде до значення, отримані дані занести в таблицю 2

Табл.2 Напряжение на резисторе при заряде и разряде емкости

|             | $U_R$<br>при $t=0$ | $U_R$<br>при $t$<br>$=1 \cdot 10$ | $U_R$<br>при $t$<br>$=2 \cdot 10$ | ... | $U_R$<br>при $t$<br>$=n \cdot 10$ |
|-------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|
| Первый цикл |                    |                                   |                                   |     |                                   |
| Второй цикл |                    |                                   |                                   |     |                                   |
| ...         |                    |                                   |                                   |     |                                   |
| Усредненное |                    |                                   |                                   |     |                                   |

|                                  |  |  |  |  |  |
|----------------------------------|--|--|--|--|--|
| $U_R$ по циклам                  |  |  |  |  |  |
| Значение тока<br>для каждого $t$ |  |  |  |  |  |

е) повторити пункт д) три-п'ять разів, після чого провести усереднення отриманих результатів для кожного моменту часу реєстрації напруги, результат занести до передостаннього рядка таблиці 92

ж) поставити ключ в положення "Разряд" и не нажимая кнопку "Сброс", повторить пункты д) и е), результаты занести в таблицу 2;

ж) перелічити значення отриманого напруги ток для известного  $R$ , используя закон Ома; з

) выстроить графики приобретенных зависимостей  $I_{зар} = f(t)$  и  $I_{раз} = f(t)$ , сопоставить с расчетными для данной неизменной времени.

11. Чим відрізняється перехідне кола від інтегруючого?

12. Чим відрізняється перехідне кола від диференційного?

## 5.2. Исследование интегрирующей цепи

Електрична схема для дослідження інтегруючого RC-кола представлена на рис.1.

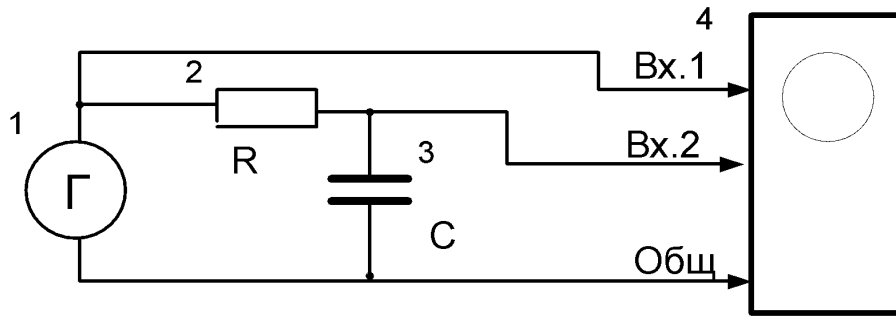


Рисунок 1. Електрична схема для дослідження інтегруючого ланцюга: 1-генератор імпульсів; 2-магазин опорів; 3-магазин ємностей; 4-осцилограф.

### Порядок виконання роботи

а) задати період повторення імпульсів  $T$  сигналу генератора і тривалість імпульсів  $\tau_i$  такий що б вийшла послідовність типу «меандр», тобто  $T \approx 2\tau_i$  і амплітуду імпульсів (3 -5) В. Вимірявши амплітуду і часові параметри послідовності імпульсів на екрані осцилографа, скориставшись перехідними коефіцієнтами, вказаними на перемикачах осцилографа.

б) розрахувати величини ємності  $C$  і опору  $R$  при якій постійна часу буде більшою за тривалість імпульсу  $\tau > \tau_i$  і зібрати схему експерименту, наведену на рис.1;

в) подати на вхід схеми сигнал від генератора імпульсів, отримати його стійке зображення на екрані осцилографа та замалювати епюри вхідних та вихідних імпульсів;

г) повторити пп.в) двічі, збільшивши та зменшивши постійну часу кола в 5 разів (шляхом збільшення та зменшення номіналів  $C$  та  $R$ )

### 5.3. Дослідження диференціюючого ланцюга

Електрична схема для дослідження диференціюючого RC-кола представлена на рис.2

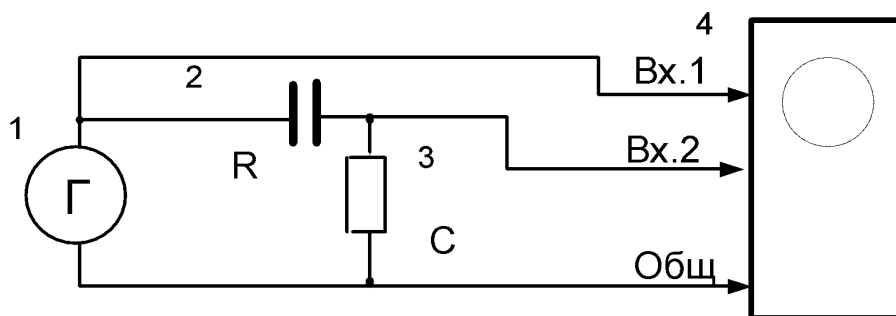


Рисунок 2. Електрична схема для дослідження диференціюючого кола:  
1-генератор; 2-магазин ємностей; 3-магазин опорів; 4-осцилограф.

### Порядок виконання роботи

а) задати період повторення імпульсів  $T$  сигналу генератора і тривалість імпульсів  $\tau_i$  такий що б вийшла послідовність типу «меандр», тобто  $T \approx 2\tau_i$  і амплітуду імпульсів (3 -5) В. Вимірявши амплітуду і часові параметри послідовності імпульсів на екрані е), скориставшись перехідними коефіцієнтами, вказаними на перемикачах осцилографа.

б) розрахувати величини ємності  $C$  та опору  $R$  при якій постійна часу буде значно меншою за тривалість імпульсу  $\tau \ll \tau_i$  та зібрати схему експерименту, наведену на рис.2;

в) подати на вхід схеми сигнал від генератора імпульсів, отримати його стійке зображення на екрані осцилографа та замалювати епюри вхідних та вихідних імпульсів;

г) повторити пп.в) двічі, збільшивши та зменшивши постійну часу кола в 10 разів (шляхом збільшення та зменшення номіналів  $C$  та  $R$ ).

д) встановити постійну часу кола рівну тривалості часу  $\tau = \tau_i$ , перетворивши таким чином диференціюючий ланцюг у перехідний і повторити пп.в). **Зміст звіту**

1. Найменування звіту про лабораторну роботу.

2. Технічні дані електровимірювальних приладів та обладнання, необхідних для виконання цієї лабораторної роботи.

3. Електричні схеми вимірів.

4. Таблиці з виміряними та обчисленими величинами.
5. Графіки зміни напруги на конденсаторі та струму в колі при заряді та розряді ємності (4 кривих).
6. Осцилограми вхідних та вихідних імпульсів інтегруючого, диференціюючого та перехідного ланцюгів при різних значеннях їх постійного часу (7 осцилограм).
6. Висновки.

### **Відповісти усно на такі запитання**

- 1.Що називається перехідним процесом в електричному ланцюзі?
2. Накресліть схеми основних типів RL- та RC- колів .
- 3.Чому дорівнює постійна часу для RL- та RC- колів?
4. Яка розмірність постійного часу кола?
- 5.Як залежить форма сигналу від величини елементів, що входять в RC- та RL-кола?
6. Як залежить форма сигналу від схеми RC- та RL- колів?
7. За яким законом зростає напруга на конденсаторі за його заряді?
8. За яким законом зменшується напруга на конденсаторі за його розряді?
9. За яким законом змінюється струм у колі при заряді конденсатора?
10. За яким законом змінюється струм у колі при розряді конденсатора?

### **Рекомендована література**

#### **Базова**

4. Маляр В.С., Шегедин О.І Теоретичні основи електротехніки. Ч.1. Навчальний посібник для студентів дистанційної форми навчання. Львів.: Новийсвіт -2000, 2014 – 168с.

5. Мурзін В.К. Загальна електротехніка. – Полтава – Кременчук, 2001. – 323 с.
6. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: теорія і практикум. - К. : Каравела, 2003. – 440с.
7. Лавріненко Ю.В. Теорія електрорадіоланцюгів.- Одеса: «Екологія», 2008.- 69с.
8. Карпов Ю.О., Мадьяров В.Г. Теоретичні основи електротехніки. «Електричні кола з розподіленими параметрами» Навчальний посібник – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 102с
9. . Мандзій Б.А., Желяк Р.І. Основи теорії сигналів: Навч. посібник / За ред. Б.А. Мандзія. – Львів: ЛДКФ “АТЛАС”, 2003. – 152 с.
10. С.Д. Гапченко, Т.М. Шелест, С.С. Кривоніс. Основи спектрального аналізу : навч.-метод. посіб. – Харків: НТУ «ХПИ», 2024. – 68 с.

#### Допоміжна

5. <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/tool/print/index.php?id=23040>
6. [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/6bilynskyj\\_elektronni\\_systemy/3.htm3](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/6bilynskyj_elektronni_systemy/3.htm3).
7. <https://www.studmed.ru> › baskakov-radiotekhnicheskie- circuits with strributed parameters.
8. <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=32479>
9. Електроніка та мікросхемотехніка : конспект лекцій – eNUFTIR  
<http://dspace.nuft.edu.ua> › jsui