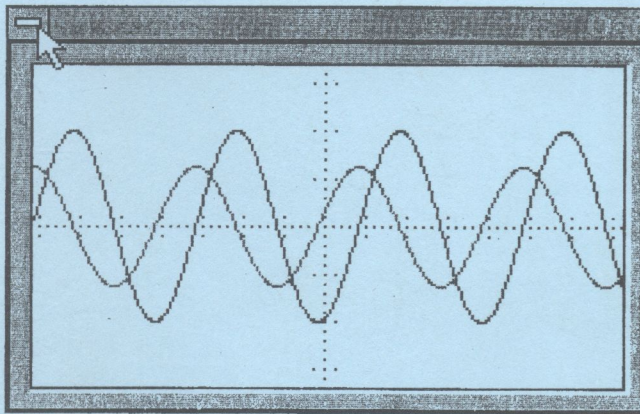


621.3.01(075)

К 30

С.Ш. Кацив, В.Г. Мадьяров, І.К. Говор

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ



4018-51

621.3.01(075)

K30

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С.Ш. Качив, В.Г. Мадьяров, І.К. Говор

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

НТБ ВНТУ

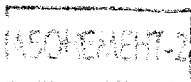


4018-51

621.3.01(075) K30 2007

Качив С.Ш. Комп'ютерне моделювання елек

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як лабораторний практикум для студентів напрямів підготовки “Комп'ютерна інженерія”, “Інформаційна безпека”, “Електроніка”, “Комп'ютерні науки”, “Лазерна та оптоелектронна техніка”, “Електромеханіка”, “Електротехніка”, “Комп'ютеризовані системи автоматики і управління” всіх спеціальностей. Протокол № 2 від 28 вересня 2006 р.



Вінниця ВНТУ 2007

УДК 621.3

К 30

Рецензенти:

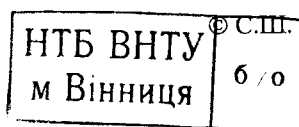
О.Д. Азаров, доктор технічних наук, професор
М.Й. Бурбело, доктор технічних наук, доцент
Л.Р. Пауткіна, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Каців С.Ш., Мад'яров В.Г., Говор І.К.
К 30 **Комп'ютерне моделювання електричних кіл.** Лабораторний практикум. - Вінниця: ВНТУ, 2007.- 89 с.

В лабораторному практикумі розглянуто комп'ютерне моделювання електричних кіл за допомогою віртуальної електронної лабораторії Electronics Workbench. Практикум розроблений у відповідності з планом кафедри та програмами дисциплін "Теоретичні основи електротехніки", "Теорія електричних та магнітних кіл", "Теорія електричних та електронних кіл", "Основи теорії електрорадіокіл", "Основи електротехніки та електроніки".

УДК 621.3



Зміст

Інструкція для використання віртуальної електронної лабораторії Electronics Workbench	4
Лабораторна робота 8wb. Резонанс напруги в лінійному електричному колі	29
Лабораторна робота 9wb. Резонанс струму в лінійному електричному колі	34
Лабораторна робота 12wb. Чотириполюсники	38
Лабораторна робота 14wb. Трифазне коло при з'єднанні приймачів зіркою	42
Лабораторна робота 15wb. Трифазне коло при з'єднанні приймачів трикутником	49
Лабораторна робота 16. Перехідні процеси в лінійних електричних колах	52
Лабораторна робота 16Аwb. Перехідні процеси в лінійних електричних колах першого порядку	58
Лабораторна робота 16Бwb. Перехідні процеси в лінійних електричних колах другого порядку	60
Лабораторна робота 16Вwb. Перехідні процеси в електричних колах при довільних збудженнях	62
Лабораторна робота 28wb. Електричні кола при несинусоїдних струмах та напругах	70
Лабораторна робота 30wb. Дослідження найпростіших випрямлячів змінного струму	75
Література	88

ІНСТРУКЦІЯ

для використання віртуальної електронної лабораторії Electronics Workbench

1.1 Загальні положення

Система схемотехнічного моделювання Electronics Workbench призначена для моделювання й аналізу електричних схем.

Програма Electronics Workbench дозволяє моделювати аналогові, цифрові і цифроаналогові схеми великого ступеня складності. Існуючі в програмі бібліотеки містять у собі великий набір найбільш використовуваних електронних компонентів. Є можливість підключення і створення нових бібліотек компонентів. Параметри компонентів можна змінювати в широкому діапазоні.

В бібліотеки компонентів програми входять пасивні елементи, транзистори, керовані джерела, керовані ключі, гібридні елементи, індикатори, логічні елементи, тригерні пристрої, цифрові й аналогові елементи, спеціальні комбінаційні та послідовні схеми. Активні елементи можуть бути подані моделями як ідеальних, так і реальних елементів. Можливо також створення своїх моделей елементів і додавання їх у бібліотеки елементів. У програмі використовується великий набір приладів для проведення вимірювань: амперметр, вольтметр, осцилограф, мультиметр, Боде-плотер (графопобудовник частотних характеристик схем), функціональний генератор, генератор слів, логічний аналізатор і логічний перетворювач.

1.2 Компоненти Electronics Workbench

Для операцій із компонентами на загальному полі Electronics Workbench виділені дві області: панель компонентів і поле компонентів (рис. 1).

Панель компонентів складається з піктограм полів компонентів, поле компонентів – з умовних зображень компонентів. Клацнувши мишею на одну з одинадцятьох піктограм, розташованих на панелі, можна відкрити відповідне поле. На рис. 1 відкрито поле пасивних компонентів (Passive). Розташування елементів у полях орієнтовано на те, як часто використовуються компонент.

Для опису компонентів більш логічним є поділ їх за типами, якого ми будемо дотримуватись надалі, даючи в кожному випадку посилання на поле, у якому розташований компонент. На рис. 2 показані усі наявні у Electronics Workbench поля компонент. Цей рисунок отриманий штучно, насправді при роботі може бути відкрито тільки одне поле компонентів. Всі компоненти можна умовно розбити на такі групи: базові компоненти; джерела; лінійні компоненти; ключі; нелінійні компоненти; індикатори; логічні компоненти; вузли комбінаційного типу; вузли послідовного типу; гібридні компоненти.

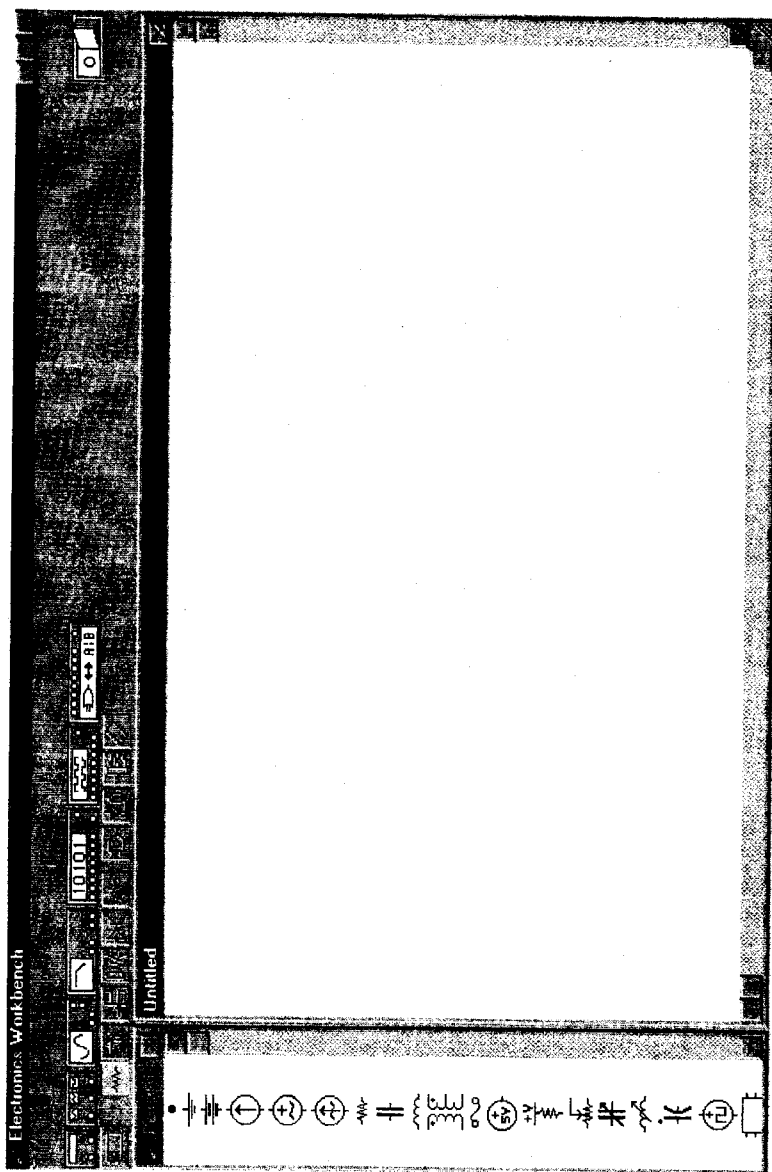


Рисунок 1 – Головне поле Electronics Workbench

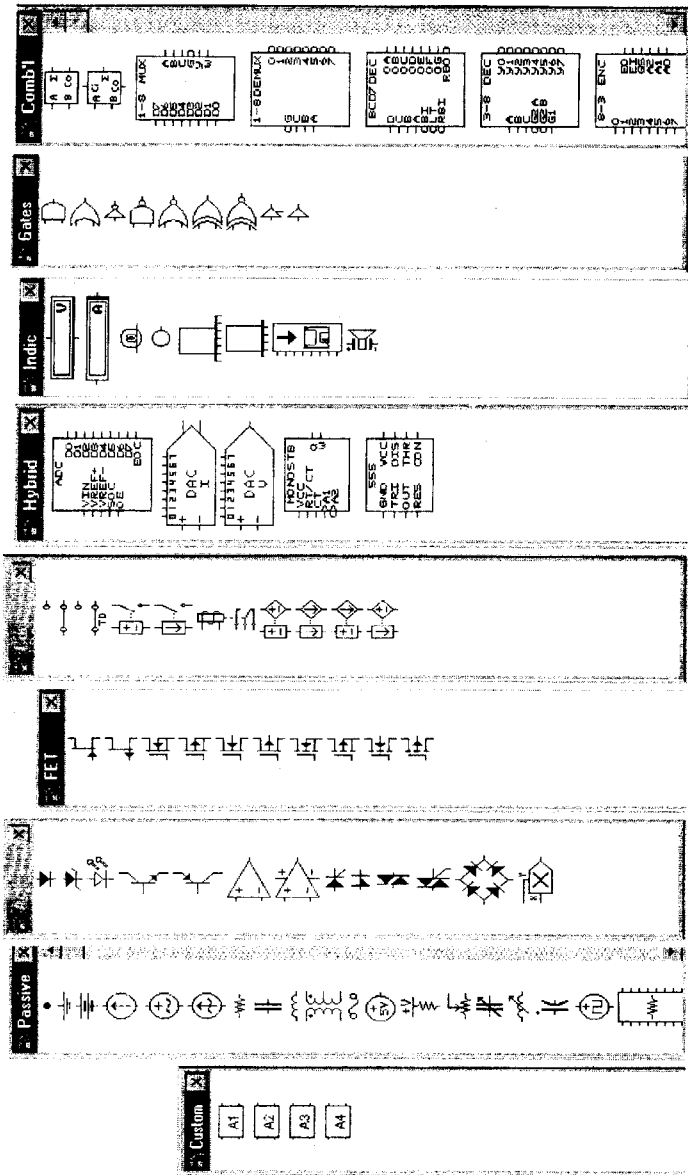


Рисунок 2 – Поля компонент

Базові компоненти

З'єднувальний вузол

З'єднувальний вузол застосовується для з'єднання провідників і створення контрольних точок. До кожного вузла може приєднуватися не більш чотирьох провідників. Після того, як схема зібрана, можна вставити додаткові вузли для приєднання приладів.

Заземлення




Компонент "заземлення" має нульову напругу і у такий спосіб забезпечує опорну точку для відліку потенціалів. Не всі схеми потребують заземлення для моделювання, проте, будь-яка схема, що містить операційний підсилювач, трансформатор, кероване джерело, осцилограф, повинна бути обов'язково заземлена, інакше прилади не будуть виконувати вимірювання або їхні показання виявляться неправильними.

Примітка. Будьте уважні при заземленні трансформаторів і керованих джерел.

Джерела живлення

Всі джерела в Electronics Workbench ідеальні. Внутрішній опір ідеального джерела напруги дорівнює нулю, тому його вихідна напруга не залежить від навантаження. Ідеальне джерело струму має нескінченно великий внутрішній опір, тому його струм не залежить від опору навантаження.

Примітка. Функціональний генератор можна використовувати як ідеальне джерело напруги.

 12V

Джерело постійної напруги

ЕРС джерела постійної напруги або батареї задається у вікні (рис. 3), яке з'являється при подвійному натисканні миші на зображенні джерела. Короткою жирною рисою в зображенні батареї позначається вивід, що має від'ємний потенціал відносно іншого виводу. ЕРС може бути задана у V (вольтах), kV (кіловольтах), mV (мілівольтах), μ V (мікрвольтах).

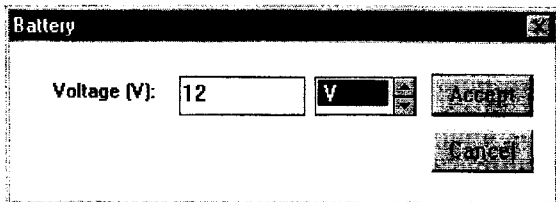


Рисунок 3

Джерело постійного струму



1A

Струм джерела постійного струму задається у вікні (рис. 4), яке з'являється при подвійному натисканні миші на зображенні джерела. Стрілка вказує напрямок струму (від "+" до "-"). Струм може бути задано в А (амперах), kA (кілоамперах), mA (міліамперах), μ A (мікроамперах).

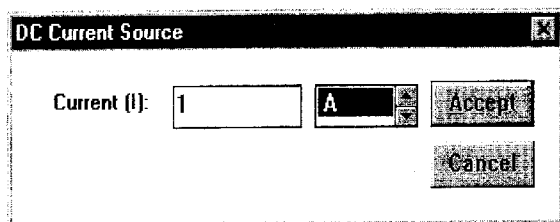


Рисунок 4

Джерело змінної напруги



120V/60Hz/0Deg

У вікні (рис. 5), яке з'являється при подвійному натисканні миші на зображенні джерела, можна задати:

- діюче значення напруги – у V (вольтах), kV (кіловольтах), mV (мілівольтах), μ V (мікрвольтах);
- частоту – у Hz (герцах), kHz (кілогерцах), MHz (мегагерцах);
- початкову фазу – в градусах.

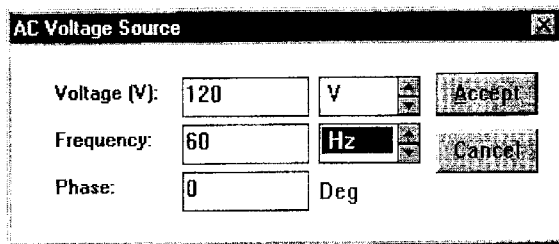


Рисунок 5

Джерело змінного струму



1A/1Hz/0Deg

У вікні (рис. 6), яке з'являється при подвійному натисканні миші на зображенні джерела, можна задати:

- діюче значення струму – в А (амперах), kA (кілоамперах), mA (міліамперах), μ A (мікроамперах);
- частоту – у Hz (герцах), kHz (кілогерцах), MHz (мегагерцах);
- початкову фазу – в градусах.

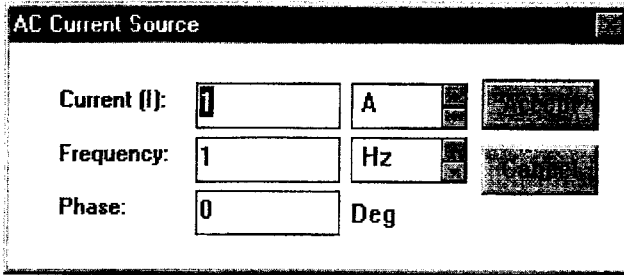


Рисунок 6

Лінійні пасивні елементи

1k Ω

Резистор



Опір задається у вікні (рис. 7), яке з'являється при подвійному натисканні миші на зображенні. Він може бути заданий в Ω (омах), k Ω (кілоомах), M Ω (мегаомах).

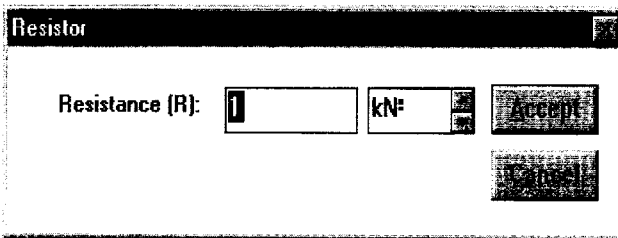


Рисунок 7

[R]/1k Ω /50%

Змінний резистор



Опір змінного резистора встановлюється за допомогою спеціального елемента – регулятора. У діалоговому вікні (рис. 8) можна встановити опір – в Ω (омах), k Ω (кілоомах), M Ω (мегаомах), початкове положення регулятора (у відсотках) і крок збільшення (також у відсотках). Є можливість змінювати положення регулятора за допомогою клавіш-ключів.

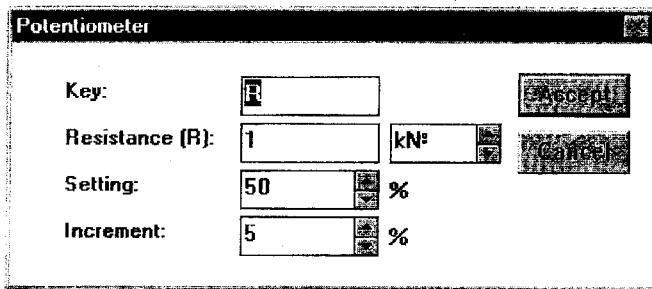


Рисунок 8

Використовувані клавіші-ключі: літери від А до Z, цифри від 0 до 9, клавіша Enter на клавіатурі, клавіша-прогалина [Space]. Для зміни положення регулятора необхідно натиснути клавішу-ключ. Для збільшення значення положення регулятора необхідно одночасно натиснути клавішу Shift і клавішу-ключ, для зменшення – клавішу-ключ.

1μF



Конденсатор

Ємність конденсатора задається у вікні (рис. 9), яке з'являється при подвійному натисканні миші на зображенні. Вона може бути задана в F (фарадах), mF (міліфарадах), μF (мікрофарадах), nF (напофарадах), pF (пікофарадах).

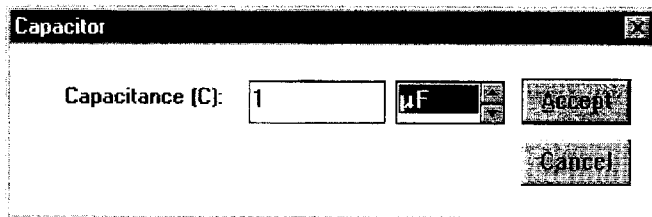


Рисунок 9

[C]/10μF/50%



Змінний конденсатор

Змінний конденсатор допускає можливість зміни величини ємності. Як видно з рис. 10, значення ємності може встановлюватися за допомогою клавіш-ключів так само, як і положення регулятора змінного резистора.

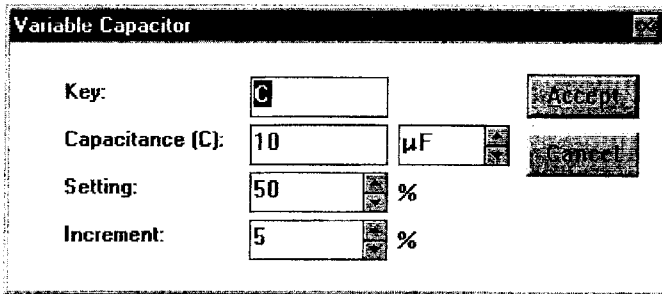


Рисунок 10

Котушка індуктивності

1mH



Індуктивність котушки (дроселя) задається у вікні (рис. 11), яке з'являється при подвійному натисканні миші на зображенні. Вона може бути задана в Н (генрі), мН (мілігенрі), μH (мікрогенрі).

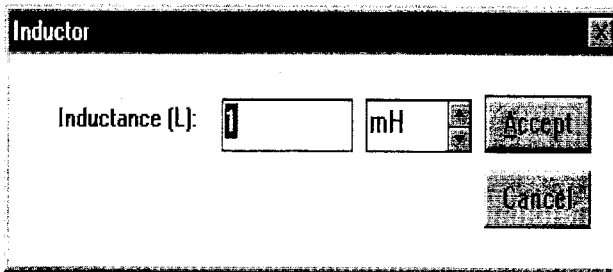


Рисунок 11

[L]/10mH/50%

Котушка зі змінною індуктивністю



Змінна індуктивність допускає можливість зміни величини. Як видно з рис. 12, значення індуктивності може встановлюватися за допомогою клавіш-ключів так само, як і положення регулятора змінного резистора.

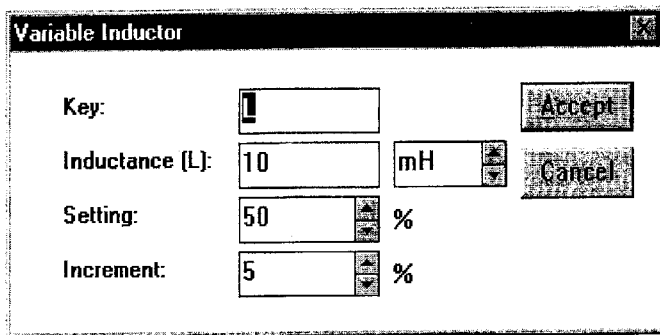


Рисунок 12

Трансформатор



Трансформатор використовується для перетворення напруги V_1 в напругу V_2 . Коефіцієнт трансформації n дорівнює відношенню напруги V_1 на первинній обмотці до напруги V_2 на вторинній обмотці. Параметр n може бути встановлений у діалоговому вікні властивостей моделі трансформатора. Трансформатор може бути виконаний із відводом середньої точки.

Примітка. Схема, що містить трансформатор, повинна бути заземлена.

Нелінійні пасивні елементи

10W/12V

Лампа розжарювання



Лампа розжарювання – елемент резистивного типу. Вона характеризується двома параметрами: максимальною потужністю P_{\max} і максимальною напругою V_{\max} , які задаються в діалоговому вікні (рис. 13). Потужність може бути задана у W (ватах), kW (кіловатах), mW (міліватах), а напруга – у V (вольтах), kV (кіловольтах), mV (мілівольтах).

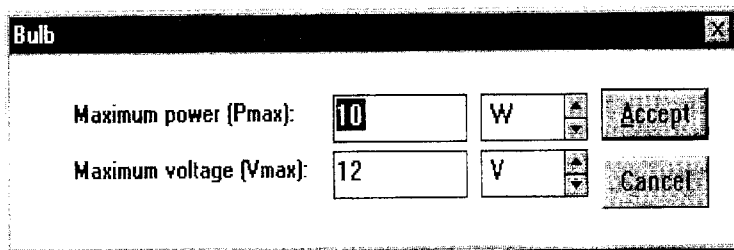


Рисунок 13

Діод



Струм через діод може протікати тільки в одному напрямку – від анода до катода. Марка діода вибирається в діалоговому вікні (рис. 14).

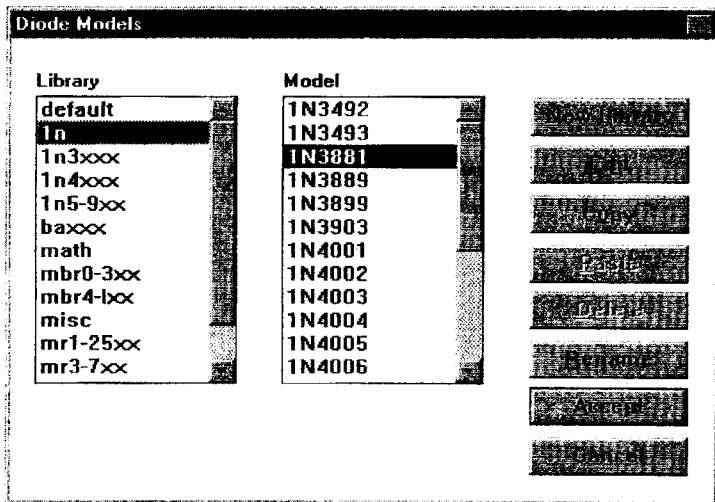


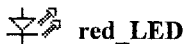
Рисунок 14

Стабілітрон



Стабілітрон використовують для стабілізації напруги. Марка вибирається в діалоговому вікні, аналогічно, як і для діода.

Світлодіод



Світлодіод випромінює видиме світло, коли струм, що проходить через нього, перевищує граничне значення. Тип вибирається в діалоговому вікні, аналогічно, як і для діода.

Мостовий випрямляч

1N3889



Мостовий випрямляч призначений для випрямлення змінної напруги.

2n2575

Тиристор



У тиристора крім анодного і катодного виводів є додатковий вивід керуючого електрода. Він дозволяє керувати моментом переходу приладу в

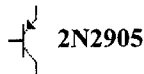
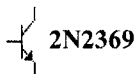
провідний стан. Марка вибирається в діалоговому вікні, аналогічно, як і для діода.

Диністор



Диністор – керований анодною напругою перемикач. Диністор не проводить струм доти, поки напруга на ньому не перевищить напруги перемикачання, тоді диністор переходить у провідний стан і його опір стає рівним нулю.

Біполярні транзистори



Біполярні транзистори є підсилювальними пристроями, керованими струмом. Вони бувають двох типів: **P-N-P** і **N-P-N**. У транзисторах обох типів стрілкою відзначається емітер, напрямком стрілки вказує напрямок протікання струму. Марка вибирається в діалоговому вікні, аналогічно, як і для діода.


Польові транзистори



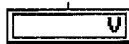
Польові транзистори керуються напругою на затворі, тобто струм, що протікає через транзистор, залежить від напруги на затворі. Польовий транзистор містить у собі протяжний шар напівпровідника n-типу або p-типу, названий каналом. Канал закінчується двома електродами, що називаються витоком і стоком.

1.3 Прилади для проведення вимірювань

Прилади з бібліотеки індикаторів

Найпростішими приладами в Electronics Workbench є вольтметр і амперметр, розташовані в полі індикаторів (Indic), що на панелі компонентів зображується значком , (див. рис. 2). У одній схемі можна застосовувати декілька таких приладів одночасно, спостерігаючи струми в різних вітках і напруги на різних елементах.

Вольтметр



Вольтметр використовується для вимірювання змінної і постійної напруг. Виділена жирною лінією сторона прямокутника, що зображує вольтметр, відповідає від'ємній клемі. Якщо двічі клацнути мишею на зображенні вольтметра, відкривається діалогове вікно (рис. 15) для зміни параметрів вольтметра – виду напруги та значення внутрішнього опору.

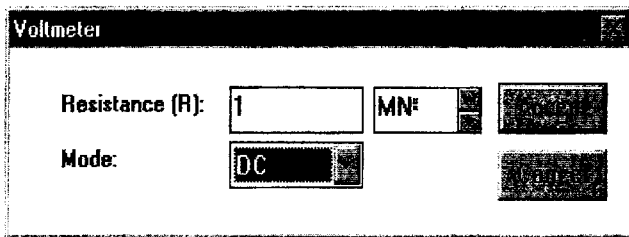


Рисунок 15

Значення внутрішнього опору вводиться з клавіатури в рядку Resistance, вид напруги (опція Mode) вибирається зі списку. При вимірюванні змінної синусоїдної напруги (AC) вольтметр буде показувати діюче значення напруги.

Примітки:

1. Як вольтметр можна використовувати мультиметр.

2. У випадку, якщо вольтметр вимірює несинусоїдну напругу, опція AC забезпечить вимірювання діючого значення змінної складової несинусоїдної напруги, а опція DC – постійної складової несинусоїдної напруги. Результуюче діюче значення несинусоїдної напруги визначається за формулою:

$$U_0 = \sqrt{U_{AC}^2 + U_{DC}^2}.$$

Амперметр



Амперметр використовується для вимірювання змінного і постійного струмів. Виділена жирною лінією сторона прямокутника, що зображує амперметр, відповідає від'ємній клемі. Діалогове вікно для зміни параметрів амперметра приведенне нижче на рис. 16.

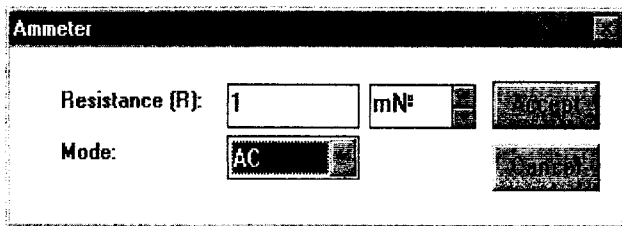


Рисунок 16

Значення внутрішнього опору вводиться з клавіатури в рядку Resistance, вид струму (опція Mode) вибирається зі списку. При вимірюванні змінного синусоїдного струму (AC) амперметр буде показувати його діюче значення.

Примітки:

1. Як амперметр можна використовувати мультиметр.
2. У випадку, якщо амперметр вимірює несинусоїдний струм, опція AC забезпечить вимірювання діючого значення змінної складової несинусоїдного струму, а опція DC – постійної складової несинусоїдного струму. Результуюче діюче значення несинусоїдного струму визначається за формулою: $I_{\partial} = \sqrt{I_{AC}^2 + I_{DC}^2}$

Прилади на панелі приладів

Крім описаних амперметра і вольтметра, у Electronics Workbench є прилади із багатьма режимами роботи, кожен із яких можна використовувати в схемі лише один раз. Ці прилади розташовані на панелі приладів (рис. 1). Зліва на панелі розташовані прилади для формування і спостереження аналогових параметрів: мультиметр, функціональний генератор, осцилограф,

Боде-плотер:



Опис зазначених приладів приведено нижче.



Мультиметр

Мультиметр використовується для вимірювання напруги, струму, опору, рівня напруги в децибелах. Для налаштування мультиметра потрібно відкрити його збільшене зображення (рис.17).

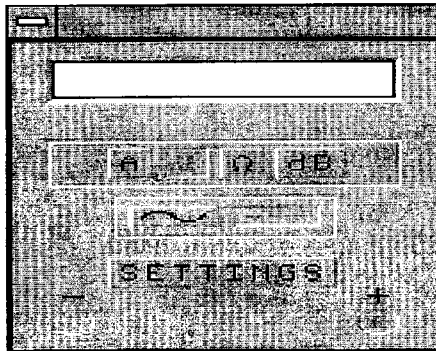






Рисунок 17



Установлення виду вимірювань провадиться натисканням відповідної кнопки. Натискання кнопки  встановлює мультиметр для вимірювання


діючого значення змінного струму і напруги, постійна складова сигналу при вимірюванні не враховується.

Для вимірювання постійних напруги і струму потрібно натиснути кнопку .

Щоб використовувати мультиметр в режимі амперметра, слід натиснути кнопку . Для вимірювання струму слід приєднати мультиметр послідовно у вітку схеми, в якій потрібно провести вимірювання. Для вимірювання напруги натисніть на мультиметрі кнопку та приєднайте  його паралельно ділянці схеми, на якій потрібно виміряти напругу.

Примітка. Якщо Ви хочете виміряти напругу чи струм в декількох точках схеми, необхідно скористатися вольтметрами або амперметрами, тому що на відміну від мультиметра, який можна ставити в схему один раз, вольтметрів чи амперметрів можна ставити необмежену кількість.

Мультиметр – єдиний у Electronics Workbench стандартний прилад, призначений для вимірювання опору. Для використання мультиметра як омметра приєднайте його паралельно ділянці кола, опір котрого потрібно виміряти, на збільшеному зображенні мультиметра натисніть кнопку  і кнопку  перемикачання в режим вимірювання постійного струму. Щоб уникнути помилкових показань, схема повинна мати з'єднання з землею і не мати контакту з джерелами живлення.

Для вимірювання рівня напруги в децибелах на збільшеному зображенні мультиметра натисніть кнопку . Мультиметр приєднується одним із виводів до точки, рівень напруги в якій потрібно виміряти, а іншим виводом до точки, щодо якої проводиться вимірювання. При вимірюванні рівня змінної напруги вимірюється рівень діючого значення. Після вмикання схеми на табло мультиметра з'явиться значення рівня напруги.

Рівень напруги в децибелах підраховується в такий спосіб:

$$dB = 20 \lg \frac{|U_{ex}|}{U_{on}}, \text{ де } U_{ex} - \text{ напруга, прикладена до виводів мультиметра,}$$

U_{on} – опорна напруга, відносно якої вимірюється рівень напруги. За замовчуванням опорна напруга встановлена рівною 1 В.

Використовуйте клавішу SETTINGS для налаштування: вхідного опору вольтметра; послідовного опору амперметра; вимірювального струму омметра; опорної напруги для відліку в децибелах. При натисканні на клавішу SETTINGS відкривається вікно налаштування параметрів мультиметра, показане нижче на рис. 18. Параметри мультиметра повинні мати такі значення, щоб вимірювальний прилад майже не впливав на схему.

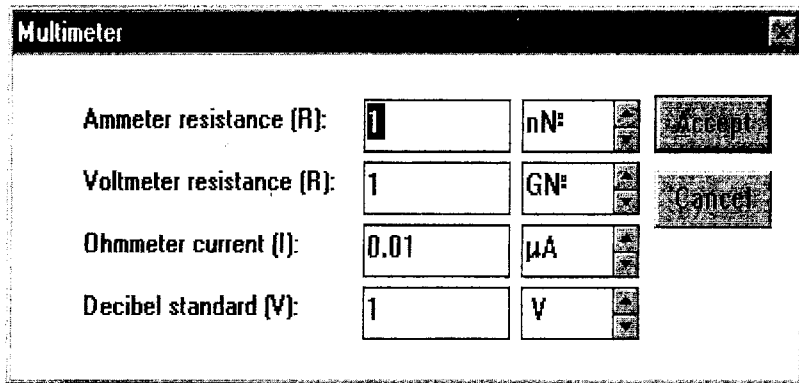


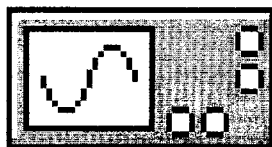
Рисунок 18



Осцилограф

Осцилограф, що імітується програмою Workbench, є аналогом двопробеневого осцилографа з пам'яттю і має дві модифікації: просту і розширену. Розширена модифікація за своїми можливостями наближається до кращих цифрових осцилографів. Через те, що розширена модель займає багато місця на робочому полі, рекомендується починати дослідження простою моделлю, а для докладного дослідження процесів використовувати розширену модель.

На рис. 19 є чотири вхідних затискачі: верхній правий затискач – загальний. Нижній правий – вхід синхронізації, його призначення буде розглянуто нижче. Лівий і правий нижні затискачі є відповідно вхід каналу А (channel A) і вхід каналу В (channel B).



Загальний
Синхронізація

Канал А
Канал В

Рисунок 19

Вивід називають загальним тому, що потенціал цього виводу є загальною точкою, щодо якої осцилограф вимірює напругу. Звичайно цей вивід заземлюють, щоб осцилограф вимірював напругу відносно нуля. Тому на панелі осцилографа цей вивід позначений «ground».

Якщо двічі клацнути мишею на зменшеному зображенні, відкривається зображення (рис.20) передньої панелі простої моделі осцилографа з кнопками керування, інформаційними полями й екраном.

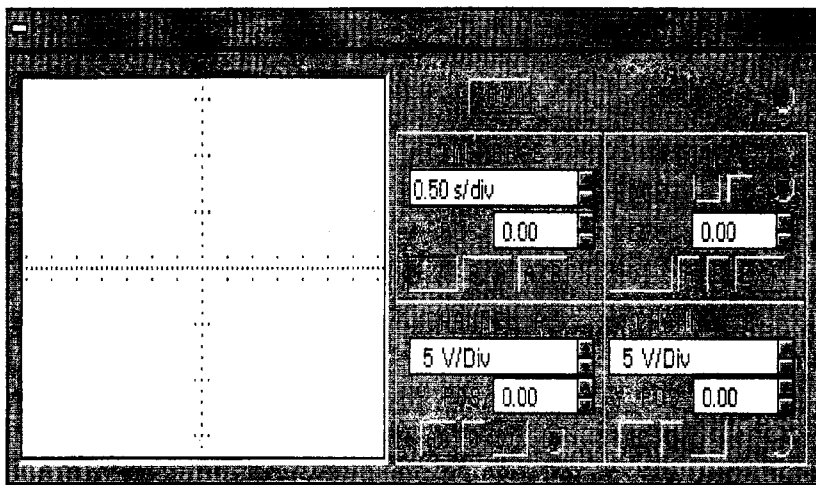









Рисунок 20

Для проведення вимірювань осцилограф потрібно настроїти, для чого слід задати: розташування осей, в яких зображається сигнал; потрібний масштаб розгортки по осях; зсув початку координат по осях; режим роботи з входу – закритий або відкритий; режим синхронізації – внутрішній або зовнішній. Настроювання осцилографа провадиться за допомогою полів керування, розташованих на панелі керування.

Панель керування має загальний для обох модифікацій осцилографа вигляд і розділена на чотири поля керування: поле керування горизонтальною розгорткою (масштабом часу); поле керування синхронізацією (запуском); поле керування каналом А; поле керування каналом В. Поле керування горизонтальною розгорткою (масштабом часу) служить для задавання масштабу горизонтальної осі осцилографа при спостереженні напруги на входах каналів А і В у залежності від часу. Часовий масштаб задається в s/div, ms/div, ms/div, ns/div.

Наприклад: Якщо Ви хочете досліджувати сигнал із частотою 1 kHz, встановіть масштаб часу рівним 0.05 ms.

За допомогою кнопок  , розташованих у полі рядка X POS, можна дискретно переміщувати початок осцилограми по горизонтальній осі. У цьому ж полі розташовані три кнопки:    , які дозволяють задавати вид залежності відображуваних сигналів.

При натисканні на кнопку  по вертикальній осі відкладається напруга, по горизонтальній осі – час, при натисканні на кнопку  по вертикальній осі відкладається амплітуда напруги на вході каналу А, по горизонтальній осі – амплітуда напруги на вході каналу В, при натисканні на кнопку  навпаки. При цьому масштаб осей визначається установленням відповідних каналів. У режимах А/В і В/А можна спостерігати частотні і фазові зсуви (фігури Ліссажу), петлі гистерезису, вольтамперні характеристики тощо.

Дві нижні частини панелі осцилографа є полями керування відображенням сигналів, поданих на входи каналів А і В, відповідно. Верхнє вікно в полі дозволяє керувати масштабом осі відображуваної напруги по вертикальній або горизонтальній осі. Масштаб для кожної осі встановлюється окремо. Щоб одержати зручне для роботи зображення на екрані осцилографа, перед початком експерименту встановіть масштаб, що відповідає очікуваній напрузі.

Нижче розташоване поле, що дозволяє дискретно переміщувати вісь Х нагору або вниз. Для того, щоб розвести зображення від каналів А і В, скористайтеся зсувом по осі Y (Y POS) для одного або двох каналів. Три нижні кнопки реалізують різні режими роботи входу осцилографа. Режим роботи осцилографа з закритим входом встановлюється натисканням на кнопку АС. У цьому режимі на вхід не пропускається постійна складового сигналу. При натисканні на кнопку DC осцилограф переходить у режим із відкритим входом. У цьому режимі на вхід осцилографа пропускається як постійна, так і змінна складова сигналу.

Верхнє праве поле керування TRIGGER визначає момент початку відображення осцилограми на екрані осцилографа. Кнопки в рядку EDGE задають момент запуску осцилограми за фронтом або за зрізом імпульсу на вході синхронізації. Поле LEVEL дозволяє задавати рівень, при перевищенні якого відбувається запуск осцилограми. Значення рівня можна зрушити на 3 поділкі вниз або вгору. Осцилограф має чотири режими синхронізації.

1. Автоматичний режим (AUTO) – запуск осцилограми провадиться автоматично при підімкненні осцилографа до схеми або при вмиканні. Коли "промінь" доходить до кінця екрана, осцилограма знову прописується з початку екрана (новий екран).

2. Режими запуску за входом "А" або "В", у яких сигналом, що запускає, є сигнал, що надходить на відповідний вхід.
3. Режим "Зовнішній запуск" (EXT - external). У цьому випадку сигналом запуску є сигнал, подаваний на вхід синхронізації.

Якщо Ви не бачите сигналу на осцилографі або сигнал слабкий – натисніть кнопку AUTO.

Натискання клавіші ZOOM на панелі простої моделі відкриває вікно розширеної моделі осцилографа (рис. 21). Панель розширеної моделі осцилографа на відміну від простої моделі розташована під екраном і доповнена трьома інформаційними таблицями, на які виводяться результати вимірювань. Крім того, безпосередньо під екраном знаходиться лінійка прокручування, що дозволяє спостерігати будь-який тимчасовий відрізок процесу від моменту вмикання до моменту вимикання схеми. По суті, розширена модель осцилографа – це інший прилад, що дозволяє набагато зручніше і більш точно проводити чисельний аналіз процесів.

На екрані осцилографа розташовані два курсори, що позначаються 1 і 2, за допомогою яких можна виміряти миттєві значення напруг у будь-якій точці осцилограми. Для цього просто перетягніть мишею курсори за трикутники в їхній верхній частині в необхідне положення. Координати точок перетинання першого курсора з осцилограмами відображаються на лівому таблиці, координати другого курсора – на середньому таблиці. На правому таблиці відображаються значення різниць між відповідними координатами першого і другого курсорів.

Результати вимірювань, отримані за допомогою розширеної моделі осцилографа, можна записати у файл. Для цього натисніть кнопку Save (Зберегти) і в діалоговому вікні введіть ім'я файла. Файлу присвоюється розширення *.scp. Він являє собою текстовий файл у ASCII кодах, у якому записані дані про значення напруг у точках приєднання осцилографа через інтервал часу, рівний масштабу горизонтальної розгортки. Щоб повернутися до старого зображення осцилографа – натисніть клавішу REDUCE, розташовану в правому нижньому кутку.

Визначення зсуву фаз між напругою та струмом.

Для визначення зсуву фаз між напругою та струмом необхідно на екрані розширеної моделі осцилографа курсор 1 (червоного кольору) виставити на початок синусоїди напруги, а курсор 2 (жовтого кольору) виставити на початок синусоїди струму. Тоді в правому вікні панелі в рядку T2-T1 користувач побачить зсув фаз між напругою та струмом – Δt , сек.

Перевести цю величину в кут зсуву фаз φ можна за формулою:

$$\varphi = 360 f \Delta t,$$

де f – частота змінного струму.

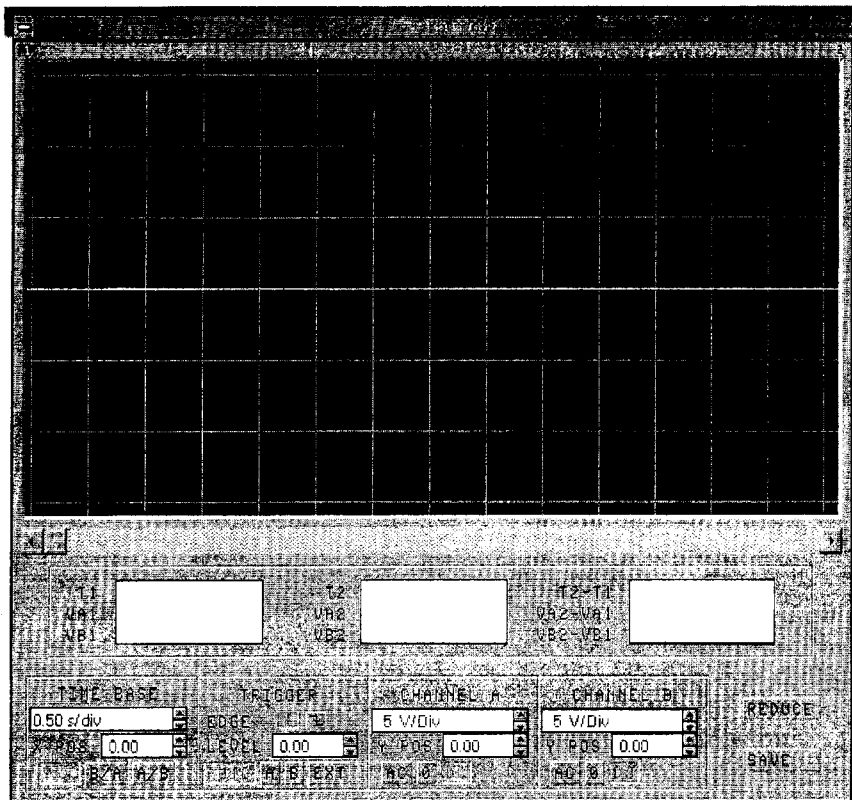


Рисунок 21

Бодє-плотер



Бодє-плотер використовується для одержання: амплітудно-частотних (АЧХ) і фазочастотних (ФЧХ) характеристик схеми. Бодє-плотер вимірює відношення амплітуд сигналів у двох точках схеми і фазовий зсув між ними. Відношення амплітуд сигналів може вимірюватися в децибелах. Для вимірювання Бодє-плотер генерує власний спектр частот, діапазон якого може задаватися при налаштуванні приладу.

На схему виводиться зменшене зображення плотера (рис. 22).

Бодє-плотер має чотири затискачі: два вхідних (IN) і два вихідних (OUT). Для вимірювання відношення амплітуд або фазового зсуву потрібно приєднати додатні виводи входів IN і OUT (ліві виводи відповідних входів) до досліджуваних точок, а два інших виводи заземлити.



Вхід Вихід

Рисунок 22

На верхній панелі збільшеного зображення плотера (рис. 23) режим (MODE) задає вид одержуваної характеристики: АЧХ або ФЧХ. Для одержання АЧХ натисніть кнопку MAGNITUDE, для одержання ФЧХ – PHASE.

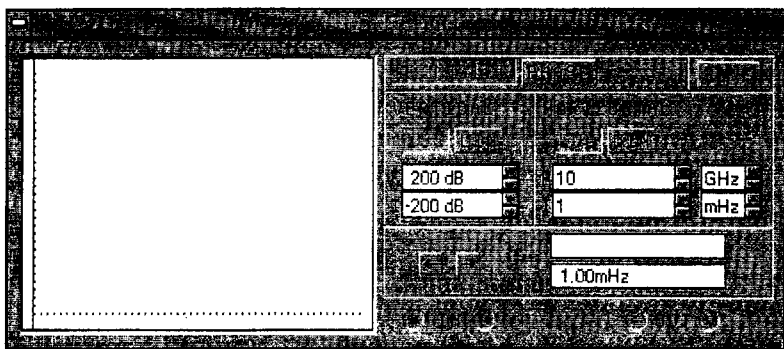


Рисунок 23

Ліва панель керування (VERTIKAL) задає: початкове (I - initial) і кінцеве (F - final) значення параметрів, що відкладаються по вертикальній осі; вид шкали вертикальної осі – логарифмічна (LOG) або лінійна (LIN). Права панель керування (HORIZONTAL) настраюється аналогічно. При одержанні АЧХ по вертикальній осі відкладається відношення напруг: у лінійному масштабі від 0 до 10E9; у логарифмічному масштабі від -200d до 200d. При одержанні ФЧХ по вертикальній осі відкладаються градуси – від -720 до 720. По горизонтальній осі завжди відкладається частота в герцах або в похідних одиницях. На початку горизонтальної шкали розташований курсор. Його можна переміщати натисканням на кнопки зі стрілками, розташованими справа від екрана або "тягти" за допомогою миші. Координати точки перетинання курсора з графіком характеристики виводяться на інформаційних полях справа.

Функціональний генератор



Генератор є ідеальним джерелом напруги, що виробляє сигнали синусоїдної, прямокутної або трикутної форми. На екран виводиться зменшене зображення генератора (рис. 24).

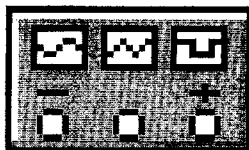


Рисунок 24

Середній вивід генератора при підімкненні до схеми забезпечує спільну точку для відліку амплітуди змінної напруги. Для відліку напруги відносно нуля спільний вивід заземлюють. Крайні правий і лівий виводи служать для подання змінної напруги на схему. Напруга на правому виводі змінюється в додатному напрямку щодо спільного виводу, напруга на лівому виводу – у від’ємному. На збільшеному зображенні генератора (рис. 25) можна задати такі параметри: частоту вихідної напруги; шпаруватість; амплітуду вихідної напруги; постійну складову вихідної напруги.

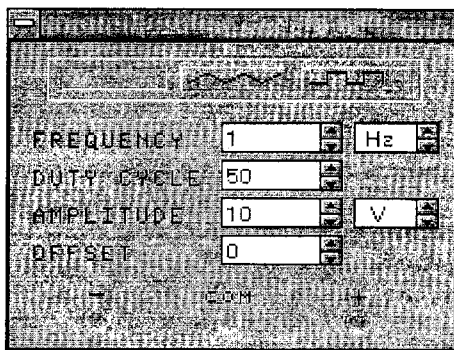


Рисунок 25

Для налаштування генератора виберіть необхідну форму вихідного сигналу і натисніть на кнопку з відповідним зображенням. Форму трикутного і прямокутного сигналів можна змінити, зменшуючи або збільшуючи значення в полі DUTY CYCLE (шпаруватість). Цей параметр визначається для сигналів трикутної і прямокутної форми. Для трикутної форми напруги він задає тривалість (у відсотках від періоду сигналу) між інтервалом наростання напруги й інтервалом спаду. Встановивши, наприклад, значення 20,

ми одержимо тривалість інтервалу наростання 20% від періоду, а тривалість інтервалу спаду - 80%. Для прямокутної форми напруги цей параметр задає співвідношення між тривалостями додатної і від'ємної частин періоду. Частота генератора може регулюватися від 1Hz до 999MHz. Значення частоти встановлюється в рядку FREQUENCY за допомогою клавіатури і кнопок із стрілками. У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця вимірювання (Hz, kHz, MHz). Амплітуда вихідної напруги встановлюється в рядку AMPLITUDE за допомогою клавіатури і кнопок із стрілками. Постійна складова змінного сигналу встановлюється в рядку OFFSET за допомогою клавіатури або кнопок із стрілками. Вона може мати як додатне, так і від'ємне значення.

1.4 Моделювання схем

Electronics Workbench дозволяє будувати аналогові, цифрові і цифроаналогові схеми різного ступеня складності. Досліджувана схема збирається на робочому полі при одночасному використанні миші і клавіатури. Застосування в роботі тільки клавіатури неможливо. При побудові і редагуванні схем виконуються такі операції: вибір компонента з бібліотеки компонентів; виділення об'єкта; переміщення об'єкта; копіювання об'єктів; вилучення об'єктів; з'єднання компонентів схеми провідниками; установлення значень компонентів; приєднання приладів. Якщо схема не розміщується на екрані монітора, будь-яку її ділянку можна переглянути за допомогою лінійок прокручування, розташованих справа і під робочим полем.

Після побудови схеми і підімкнення приладів аналіз її роботи починається після натискання вимикача в правому верхньому кутку вікна програми.

Зробити паузу при роботі схеми можна натисканням клавіші F9 на клавіатурі. Відновити процес можна повторним натисканням клавіші F9. Повторне натискання вимикача в правому верхньому кутку припиняє роботу схеми. Вибір потрібного компонента провадиться з поля компонентів, потрібне поле компонентів вибирається натисканням лівої кнопки миші на одній з піктограм панелі компонентів. При цьому в полі компонентів з'являються зображення відповідних компонентів. Розподіл компонентів по полях компонентів дивиться в підрозділі 1.2.

Після вибору поля компонентів потрібний компонент за допомогою миші переміщується на робоче поле. Виділення об'єкта здійснюється за допомогою миші (під об'єктом припускається як один компонент, так і група компонентів). При виборі компонента потрібно встановити курсор миші на потрібний компонент і клацнути лівою кнопкою миші. Для вибору групи компонентів потрібно встановити курсор миші в один із кутків прямокутної області, що містить групу, і, натиснувши ліву кнопку миші,

розтягнути рамку до необхідних розмірів, після чого відпустити кнопку. Обраний об'єкт змінює свій колір на червоний.

Переміщення об'єкта провадиться за допомогою миші або стрілок на клавіатурі. Для переміщення об'єкт потрібно попередньо виділити, а потім за допомогою миші або стрілок на клавіатурі перемістити в потрібне місце. При переміщенні мишею встановить курсор миші на об'єкт і, натиснувши ліву кнопку миші, перетягнеть об'єкт. Об'єкт можна повертати на кут, кратний 90° . Для цього об'єкт потрібно попередньо виділити, а потім вибрати команду Rotate із меню Circuit або натиснути $\text{Ctrl} + R$. При цьому об'єкт повернеться на 90° за годинниковою стрілкою. При повороті групи компонентів на 90° повертається кожний компонент, а не вся група цілком.

Для з'єднання компонентів провідниками потрібно підвести курсор миші до виводу компонента. При цьому на виводі компонента з'явиться велика чорна точка. Натиснувши ліву кнопку миші, перемістять її курсор до виводу компонента, із котрим потрібно з'єднатися, і відпустить кнопку миші. Виводи компонентів з'єднуються провідником.

Всі провідники в Electronics Workbench за замовчуванням будуть чорного кольору, але колір провідника можна змінити. Для цього потрібно подвійним клацанням миші на зображенні провідника відкрити вікно, приведене на рис. 26, і у вікні мишею вибрати необхідний колір. Якщо в схемі компоненти розміщені неакуратно, то може знадобитися спрямити провідники, що з'єднують компоненти. Це можна зробити, перемістивши компоненти так, щоб провідники зображалися прямими лініями.

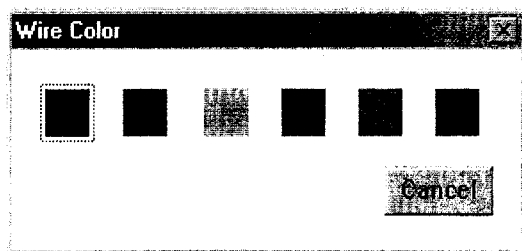


Рисунок 26

Установлення значень параметрів компонентів проводиться в діалоговому вікні властивостей компонента, що відкривається подвійним клацанням миші на зображенні компонента або командою Value із меню Circuit (при цьому компонент повинен бути виділений). У діалоговому вікні за допомогою клавіатури і миші потрібно ввести необхідні значення параметрів компонента і натиснути Асерпт або Cancel для підтвердження або скасування встановленого значення.

У Electronics Workbench є сім приладів, що формують різні впливи й аналізують реакцію схеми. Ці прилади подані у вигляді піктограм, розта-

шованих на панелі інструментів. Для підімкнення приладу до схеми потрібно мишею перетягнути прилад із панелі інструментів на робоче поле і прислати виводи приладу до досліджуваних точок. Деякі прилади потрібно заземлювати, інакше їхні показання будуть помилковими. Розширене зображення приладу виводиться у вікні, що з'являється після подвійного клацання мишею на зменшеному зображенні приладу або після виконання команди Zoom із меню Circuit. Закрити це вікно можна командою Close із меню, що з'являється при клацанні на кнопці в лівому верхньому кутку вікна. Також можна використовувати комбінацію Alt+F4. Настроювання приладів описується в підрозділі 1.2.

Electronics Workbench дозволяє об'єднувати ділянки схеми в субблоки (підсхеми). Для цього необхідно виділити ділянку схеми, що потрібно об'єднати в субблок. Після виділення потрібно вибрати пункт Subcircuit меню Circuit. На екрані з'явиться діалогове вікно, яке наведене нижче на рис. 27.

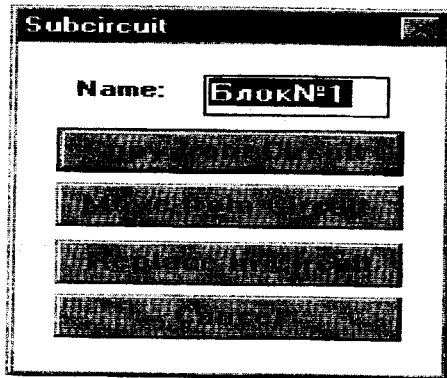


Рисунок 27

У рядку Name потрібно ввести ім'я субблока, потім потрібно натиснути одну з чотирьох кнопок: скопіювати зі схеми (Copy from circuit); виділити зі схеми (Move from circuit); замінити в схемі (Replace in circuit); скасування (Cancel). При натисканні кнопки "Скопіювати зі схеми" схема залишається без змін, а в полі компонентів Custom з'являється субблок із привласненим йому ім'ям.

При натисканні на кнопку "Замінити в схемі" виділена ділянка схеми замінюється в схемі субблоком, як показано на рис. 28. При цьому так само, як і в попередньому випадку, відкривається вікно з ім'ям, привласненим субблоку, а в полі компонентів Custom з'являється субблок із цим ім'ям.

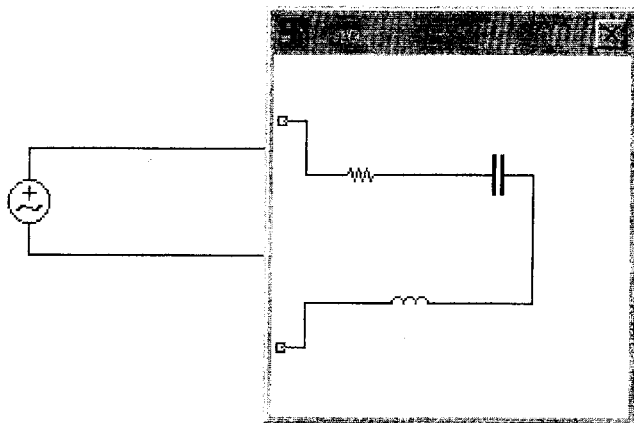


Рисунок 28

1.5 Приклад виконання лабораторної роботи за допомогою Electronics Workbench.

ПРОСТІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Порядок виконання роботи

1. Зберіть коло згідно з рис. 29.
2. Напругу на вході в коло, активні і реактивні складові опорів резистора, котушки і конденсатора встановіть у відповідності з результатами розрахунків за вашим варіантом раніше виконаної лабораторної роботи №6.
3. Порівняйте струм у колі і напруги на елементах з аналогічними даними раніше виконаної лабораторної роботи №6.
4. За допомогою осцилографа визначте кут зсуву фаз між струмом та напругою в колі. Для цього необхідно на екрані розширеної моделі осцилографа (див. рис. 21) курсор 1 (червоного кольору) виставити на початок синусоїди напруги, а курсор 2 (жовтого кольору) виставити на початок синусоїди струму. Тоді в правому вікні панелі в рядку T2-T1 користувач побачить зсув фаз між напругою та струмом – Δt , сек. Перевести цю величину в кут зсуву фаз φ можна за формулою: $\varphi = 360 f \Delta t$, де f – частота змінного струму. Порівняйте його з результатами розрахунків за вашим варіантом раніше виконаної лабораторної роботи №6.

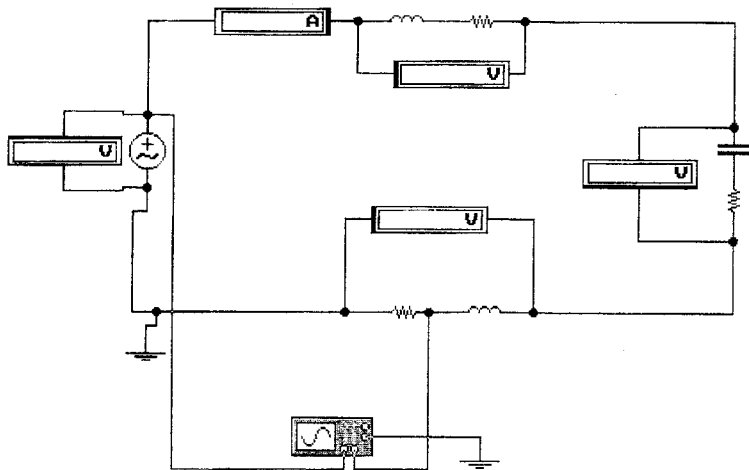


Рисунок 29

Лабораторна робота №8wb

Резонанс напруги в лінійному електричному колі

Мета роботи : дослідити електричний резонанс в нерозгалуженому колі з котушкою індуктивності та конденсатором.

Теоретичні положення

Під резонансним режимом роботи кола розуміють режим при якому, не дивлячись на наявність індуктивностей і ємностей, вхідний опір і вхідна провідність кола є чисто активними.

В резонансному режимі коло в цілому виявляє себе як активний опір, тому струм і напруга на вході кола збігаються за фазою. Реактивна потужність кола при цьому дорівнює нулю.

Розглянемо резонанс напруги в колі, яке складається з послідовно з'єднаних елементів r , L , C (рис. 8.1), і яке називають послідовним коливальним контуром.

Струм буде збігатися за фазою з прикладеною напругою, якщо комплексний вхідний опір кола

$$\underline{Z} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (8.1)$$

буде чисто активним, тобто $\underline{Z} = r$, а реактивний опір

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0. \quad (8.2)$$

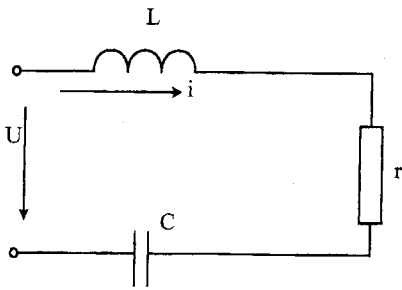


Рисунок 8.1

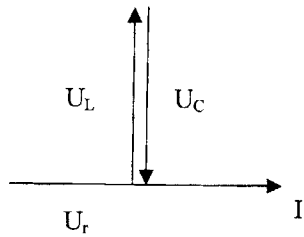


Рисунок 8.2

Ця рівність визначає умову виникнення резонансу в колі, з якої знаходять резонансну частоту:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (8.3)$$

Із умови резонансу видно, що резонанс можна досягти зміною параметрів кола, а також частоти.

Струм в колі (рис. 8.1) буде дорівнювати:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (8.4)$$

Оскільки при резонансі напруги реактивний опір дорівнює нулю, то повний опір при резонансі досягає свого найменшого значення. Тому при незмінній вхідній напрузі струм в колі і активна потужність при резонансі мають найбільші значення:

$$I = \frac{U}{r}, \quad P = I^2 r = \frac{U^2}{r}. \quad (8.5)$$

Кут зсуву фаз між вхідними напругою та струмом при резонансі дорівнює нулю:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r} = 0; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{x}{r} = \operatorname{arctg} \frac{\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}}{r} = 0 \quad (8.6)$$

тому дорівнює нулю і реактивна потужність кола: $Q = UI \sin \varphi = 0$.

Реактивні потужності, індуктивності та ємності відрізняються від нуля, рівні за значеннями, але протилежні за знаком:

$$Q_L = -Q_C = I^2 \omega_0 L = I^2 \frac{1}{\omega_0 C}.$$

Відношення реактивної потужності Q_L або Q_C до потужності, яка втрачається в колі, називають *добротністю* контуру і позначають літерою Q :

$$Q = \frac{Q_L}{P} = \frac{|Q_C|}{P} = \frac{I^2 \omega_0 L}{I^2 r} = \frac{\omega_0 L}{r}. \quad (8.7)$$

Величину, обернену добротності, називають *затуханням* контуру і позначають літерою $\alpha = \frac{1}{Q}$.

Вектори напруги на індуктивності $\underline{U}_L = Ijx_L$ і ємності $\underline{U}_C = -Ijx_C$ при резонансі однакові за значеннями і протилежні за напрямком. Тому вони компенсують один одного, і напруга на вході кола дорівнює спаду напруги на активному опорі: $\underline{U} = \underline{I}r$. Векторна діаграма для цього випадку показана на рис. 8.2.

Напруги на реактивних елементах при резонансі можуть значно перевищувати вхідну напругу. Тому резонанс в нерозгалуженому колі називають резонансом напруги.

При зміні частоти вхідної напруги змінюється реактивний опір кола $x = \omega L - \frac{1}{\omega C}$, тобто, будуть змінюватись струм, напруга на елементах та кут зсуву фаз між струмом та вхідною напругою. Залежності струму, напруги на елементах і кута зсуву від частоти вхідної напруги при незмінній його амплітуді називають частотними характеристиками контуру.

Коли резонанс в колі досягається зміною параметрів L або C (при фіксованій частоті джерела напруги), залежності струму в контурі і напруг на індуктивності і ємності від L або C називаються настроювальними кривими (рис. 8.3).

Настроювальні криві, як і частотні характеристики будуються при сталій вхідній напрузі.

Якщо резонанс в колі досягається зміною ємності C , при ємностях менших резонансної, реактивний опір кола має ємнісний характер, тобто кут зсуву фаз в колі $\varphi < 0$ (8.6).

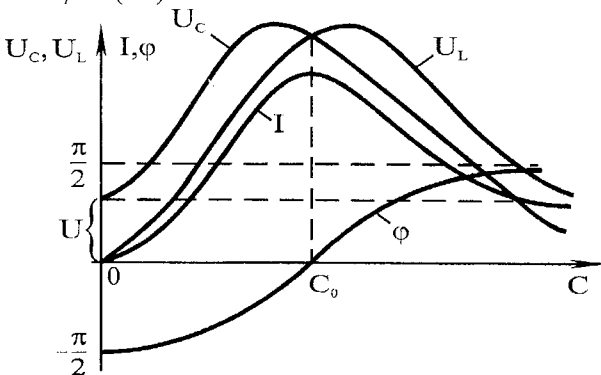


Рисунок 8.3

Зменшуючись за модулем із збільшенням ємності, він стає рівним нулю при резонансі, а потім змінює знак і збільшується з подальшим збільшенням ємності.

На практиці резонанс напруг використовується, головним чином, в радіотехніці – для збільшення напруг, а також в електричних фільтрах, коли бажано пропустити струм певної частоти.

Порядок виконання роботи

1. За вказівкою викладача вибрати із таблиці 8.1 параметри L , R та C .

Таблиця 8.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L , мГн	150	140	200	160	150	120	180	210	130	250
C , мкФ	16,9	9,23	12,7	11	7,5	14,7	5,5	12,1	6	15,8
R , Ом	23	30	31	30	35	22	2,5	33	35	31

2. Визначити резонансну частоту f_0 .
3. На набірному полі зібрати схему відповідно до рис. 8.4.

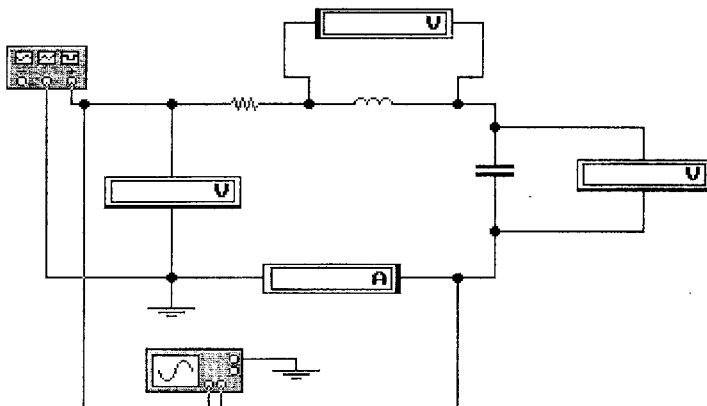


Рисунок 8.4

4. На вхід схеми подати напругу 50 В від функціонального генератора.
5. Змінюючи частоту генератора від 10 Гц до $3f_0$, виміряти величини зазначені в табл. 8.2.

Рекомендації:

- починати виміри із резонансної частоти;
- знімати 4-5 точок до і після резонансу;
- враховуючи особливість резонансної характеристики, поблизу резонансу точки брати частіше (10 – 20Гц);
- кут зсуву фаз між входною напругою і струмом вимірювати з допомогою двопроменевого осцилографа, канал В якого підімкнений до ам-

перметра, напруга на якому буде пропорційна струму (методика визначення куту зсуву фаз наведена в підрозділі 1.5 інструкції для використання *Electronics Workbench*).

6. Для встановлення залежності добротності від активного опору виставити частоту генератора f_0 і зробити виміри для $0.5R$ та $2R$.

Таблиця 8.2

	Виміри						Розрахунки			
	U_{ax} , В	f , Гц	U_L , В	U_C , В	I , А	$\frac{\Delta I, \text{сек.}}{\phi, \text{град}}$	Z , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	ϕ , град
1						_____				
2						_____				
3						_____				
4						_____				
5						_____				
6						_____				
7						_____				
8						_____				
9						_____				

Оброблення результатів дослідів

- Для кожного значення досліджуваних частот обчислити повний опір кола, реактивні опори і кут зсуву фаз між вхідною напругою і струмом, занести ці величини в табл. 8.2.
- В одній системі координат побудувати залежності: U_L , U_C , I , $\phi = F(f)$.
- Побудувати в масштабі три векторні діаграми струму та напруги: до резонансу ($f < f_0$), в момент резонансу ($f = f_0$) та після резонансу ($f > f_0$).
- Обчислити добротність коливального контуру для $0.5R$, R , $2R$.
- Зробити висновки.

Контрольні запитання

- Який режим роботи кола називають резонансним?
- Як дослідним шляхом досягти резонансу в колі C послідовно з'єднаними котушкою індуктивності і конденсатором?

3. Від чого залежить добротність контуру, резонансна частота контуру?
4. Записати умову резонансу в колі в загальному випадку?
5. Як знайти вираз ω_0 для розгалуженого кола?

Лабораторна робота № 9wb

Резонанс струмів в лінійному електричному колі.

Мета роботи: дослідити електричний резонанс в лінійному колі синусоїдного струму з паралельним з'єднанням котушки індуктивності і конденсатора.

Теоретичні положення

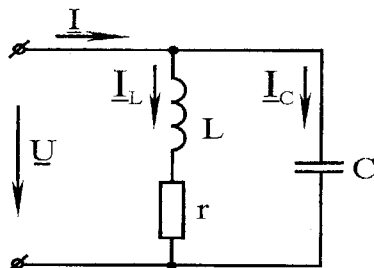


Рисунок 9.1

На рис. 9.1 зображено коло з паралельним з'єднанням котушки з втратами і конденсатором, яке називають паралельним коливальним контуром.

Повну вхідну провідність кола позначають виразом $y = \sqrt{g^2 + b^2}$, де g та b – відповідно активна та реактивна провідності кола:

$$g = \frac{r}{r^2 + \omega^2 L^2}, \quad b = \frac{\omega L}{r^2 + \omega^2 L^2} - \omega C.$$

За визначенням резонансу умова резонансу запишеться:

$$b = \frac{\omega L}{r^2 + \omega^2 L^2} - \omega C = 0. \quad (9.1)$$

Звідки знаходять резонансну частоту:

$$\omega_p = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{r^2}{\rho^2}}, \quad (9.2)$$

де $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристичний опір контуру;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансна частота при відсутності втрат в контурі.

При наявності умови резонансу повна вхідна провідність контуру $y=g$ і вхідний струм збігаються за фазою з вхідною напругою. Векторна діаграма кола (рис. 9.1) при резонансі показана на рис. 9.2.

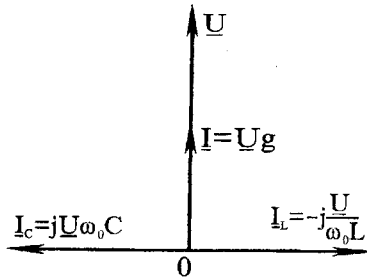


Рисунок 9.2

Маючи умову резонансу легко знайти значення струмів у колі (рис.1) в стані резонансу:

$$I = Ug = U \frac{r}{\rho^2}, \quad I_L = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \omega^2 \rho L^2}} = \frac{U}{\rho}, \quad (9.3)$$

$$I_C = U\omega_p C = \frac{U}{\rho} \sqrt{1 - \frac{r^2}{\rho^2}}.$$

З останнього виразу ясно, що при $\rho \gg r$ струми в вітках значно перевищують вхідний струм. Тому резонанс в паралельному коливальному контурі називають резонансом струмів. В практиці відношення $\frac{\rho}{r}$ може досягти сотень одиниць і в стільки разів вхідний струм буде менший струмів у вітках.

При резонансі реактивні потужності котушки конденсатора рівні за значенням і протилежні за знаком

$$Q_L = Q_C = I_L^2 \omega_p L = \frac{I_C^2}{\omega_p C} = \frac{U^2}{\rho} \sqrt{1 - \frac{r^2}{\rho^2}}, \quad (9.4)$$

тому реактивна потужність всього кола дорівнює нулю. Потужність, яка втрачається в котушці при резонансі,

$$P = UI = I_L^2 r = \frac{U^2}{\rho^2} r. \quad (9.5)$$

Величину, яка показує, в скільки разів реактивна потужність котушки або конденсатора при резонансі більша за активну потужність, яка втрачається в контурі, називають добротністю контуру і позначають літерою Q

$$Q = \frac{Q_L}{P} = \frac{|Q_C|}{P} = \sqrt{\frac{\rho^2}{r^2} - 1}. \quad (9.6)$$

Якщо $\rho \gg r$, то $Q \approx \frac{L}{r}$ і струм на вході при резонансі приблизно в Q раз менший струмів у вітках.

Стану резонансу в колі, як це очевидно із умови резонансу (9.1), можна досягти зміною частоти ω або параметрів кола r , L , C . Залежності струмів у колі (рис. 9.1) від частоти і параметрів кола визначають виразами:

$$I = Uy = U \sqrt{\left(\frac{r}{r^2 + \omega^2 L^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega L}{r^2 + \omega^2 L^2} - \omega C\right)^2},$$

$$I_C = U\omega C,$$

$$I_L = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}}.$$
(9.7)

В практиці, як правило, настроювання контурів в резонанс здійснюють за допомогою зміни ємності, оскільки ємність можна легко змінювати в широких межах.

З виразу (9.3) витікає, що при настроюванні контуру в резонанс за допомогою зміни ємності вхідний струм в стані резонансу буде мінімальним, також мінімальною буде активна потужність, яку споживає контур.

Порядок виконання роботи

1. За вказівкою викладача вибрати із таблиці 9.1 параметри L , R та C .

Таблиця 9.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L , мГн	150	120	140	150	180	200	130	160	210	250
f_0 , Гц	100	120	140	150	160	100	180	120	100	80
R , Ом	23	22	30	35	45	31	35	30	33	31

2. Для величин, отриманих в п. 1 визначити ємність конденсатора C , який треба підімкнути паралельно до котушки (рис. 9.1), щоб досягти резонансу при заданій частоті.

3. На набірному полі зібрати схему відповідно до рис. 9.3, на вхід схеми подати напругу 50 В від функціонального генератора.

4. Змінюючи частоту генератора від 10 Гц до $3f_0$ зняти значення вхідного струму, струму в котушці і ємності, кута зсуву фаз між напругою і вхідним струмом і занести ці величини в табл. 9.2.

Рекомендації:

- починати виміри із резонансної частоти;
- знімати 4-5 точок до і після резонансу;
- враховуючи особливість резонансної характеристики, поблизу резонансу точки брати частіше, з інтервалом 20-30 Гц;
- кут зсуву фаз між напругою і вхідним струмом вимірювати з допомогою осцилографа;

- для зняття кривої струму канал В двопробеневого осцилографа підімкнений до амперметра, який вимірює вхідний струм (методика визначення куту зсуву фаз наведена в підрозділі 1.5 інструкції для використання Electronics Workbench).

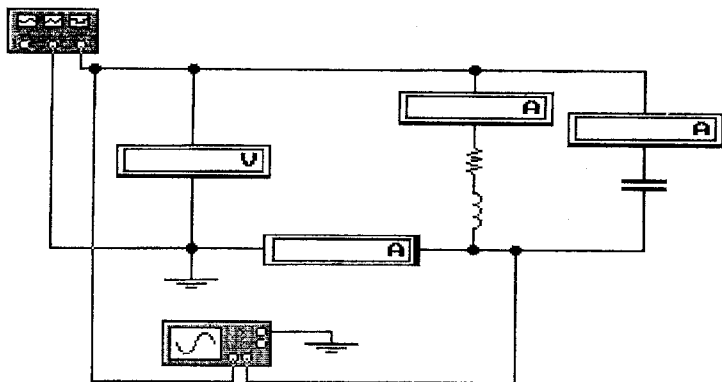


Рисунок 9.3

Таблиця 9.2

	Виміри					Розрахунки					
	I , А	I_L , А	I_C , А	Δt , сек. φ , град	f , Гц	Y , См	b_L , См	b_C , См	g , См	φ , гр.	
1				_____							
2				_____							
3				_____							
4				_____							
5				_____							
6				_____							
7				_____							
8				_____							
9				_____							

Оброблення результатів дослідів

1. Для кожного дослідів визначити повну провідність всього кола, активну і реактивну провідність котушки і конденсатора, кут зсуву фаз між напругою і вхідним струмом і занести в табл. 9.2.
2. В одній системі координат побудувати залежності: I , I_C , I_L , $\varphi = F(f)$.
3. За даними табл. 9.2 побудувати векторні діаграми до, в момент і після резонансу.
4. Визначити добротність досліджуваного коливального контуру.
5. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняється резонанс струмів від резонансу напруг?
2. Як дослідним шляхом встановити в паралельному коливальному контурі резонансний режим?
3. Що таке добротність контуру, як її визначити дослідним шляхом?
4. Як аналітично визначити ємність паралельного контуру, при якій настає резонанс?
5. Чому до резонансу $\varphi > 0$?

Лабораторна робота № 12wb

Чотириполосники

Мета роботи: експериментальне визначення параметрів чотириполосника.

Теоретичні положення

Чотириполосником називають ділянку кола або електричний апарат, що має чотири затискачі. Два затискачі – 1 та 1' називають вхідними або первинними, два інші затискачі – 2 та 2' – вихідними або вторинними (рис. 12.1).

Лінійним пасивним чотириполосником називають чотириполосник, який складається виключно із пасивних лінійних елементів R , L , C . Якщо приєднати чотириполосник до джерела синусоїдної ЕРС, вибрати додатні напрямки струмів та напруг згідно з рис. 12.1., можна записати:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}_{11}\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\underline{I}_2; \quad \underline{I}_1 = \underline{A}_{21}\underline{U}_2 + \underline{A}_{22}\underline{I}_2 \quad (12.1)$$

Ці рівняння називають основними рівняннями чотириполосника. Сталі комплексні коефіцієнти \underline{A}_{11} , \underline{A}_{12} , \underline{A}_{21} , \underline{A}_{22} – первинні параметри чотириполосника; вони характеризують даний чотириполосник і залежать виключно від його активних та реактивних опорів та схеми їх з'єднання.

Параметри \underline{A}_{11} та \underline{A}_{22} безрозмірні, \underline{A}_{12} – (Ом), \underline{A}_{21} – (См). Вони пов'язані між собою співвідношенням $\underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{12}\underline{A}_{21} = 1$ і саме тому тільки

три з них незалежні.

Будь який чотириполосник можна замінити еквівалентним, що має такі ж самі параметри \underline{A}_{11} , \underline{A}_{12} , \underline{A}_{21} , \underline{A}_{22} . Найпростіший еквівалентний чотириполосник в загальному випадку повинен складатися з трьох елементів (згідно з числом незалежних параметрів).

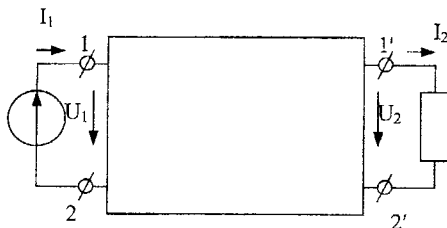


Рисунок 12.1

Отже, будь-який чотириполосник з відомими параметрами може бути замінений будь-яким з двох еквівалентних йому чотириполосників:

а) Т-подібним, елементи якого з'єднані згідно з рис. 12.2.

$$\underline{Y}_0 = \underline{A}_{21}; \quad \underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{21}}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{A}_{22} - 1}{\underline{A}_{21}}; \quad (12.2)$$

б) П-подібним, елементи якого з'єднані згідно з рис. 12.3.

$$\underline{Z}_0 = \underline{A}_{12}; \quad \underline{Y}_1 = \frac{\underline{A}_{22} - 1}{\underline{A}_{12}}; \quad \underline{Y}_2 = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{12}}. \quad (12.3)$$

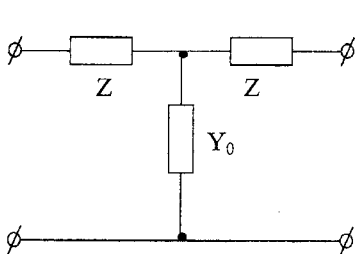


Рисунок 12.2

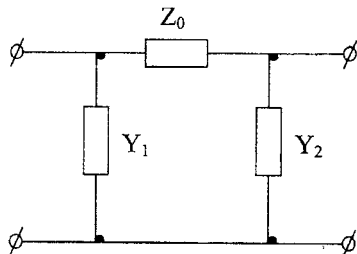


Рисунок 12.3

Для визначення параметрів чотириполосника дослідним шляхом визначають комплекси вхідних опорів з боку затискачів:

\underline{Z}_{1X} – первинних при розімкненні вторинних;

\underline{Z}_{1K} – первинних при замкнених накоротко вторинних;

\underline{Z}_{2X} – вторинних при розімкненні первинних;

\underline{Z}_{2K} – вторинних при замкнених накоротко первинних.

Для визначення цих комплексних опорів необхідно виміряти підведені

до чотириполосника в кожному досліді діючі значення напруги U та струму I , а також кут зсуву фаз між ними (значення та знак).

Якщо кожний із вхідних опорів виразити через параметри чотириполосника, то можна визначити їх за формулами:

$$\underline{A}_{11} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1X} \underline{Z}_{1K}}{\underline{Z}_{2K} (\underline{Z}_{1X} - \underline{Z}_{1K})}}; \underline{A}_{12} = \underline{A}_{11} \underline{Z}_{2K}; \quad (12.4)$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{\underline{A}_{11}}{\underline{Z}_{1X}}; \underline{A}_{22} = \underline{A}_{11} \frac{\underline{Z}_{2K}}{\underline{Z}_{1K}}$$

Правильність первинних параметрів можна перевірити за формулою: $\underline{A}_{11} \underline{A}_{22} - \underline{A}_{12} \underline{A}_{21} = 1$.

Для характеристики будь-якого чотириполосника можна використати не тільки первинні, але і вторинні параметри.

1. Характеристичний опір чотириполосника при прямому вмиканні

$$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\underline{Z}_{1X} \underline{Z}_{1K}} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{11} \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21} \underline{A}_{22}}}. \quad (12.5)$$

2. Той же опір при зворотному вмиканні

$$\underline{Z}_{C2} = \sqrt{\underline{Z}_{2X} \underline{Z}_{2K}} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{22} \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21} \underline{A}_{11}}}. \quad (12.6)$$

Характеристичні опори мають такі властивості: якщо при прямому вмиканні опір навантаження взяти рівним \underline{Z}_{C2} , то вхідний опір буде дорівнювати \underline{Z}_{C1} і навпаки. Таке вмикання чотириполосника називають узгодженим.

3. Коефіцієнт розповсюдження чотириполосника γ .

За означенням $\gamma = \frac{1}{2} \ln \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2}$ при узгодженому вмиканні чотириполосника, звідки його залежність від параметрів:

$$\gamma = \ln \left(\sqrt{\underline{A}_{11} \underline{A}_{22}} + \sqrt{\underline{A}_{12} \underline{A}_{21}} \right). \quad (12.7)$$

Як і всі інші коефіцієнти γ - комплексне число ($\gamma = \alpha + j\beta$), де α - коефіцієнт згасання, відображає зменшення діючих значень напруги та струму на виході чотириполосника в порівнянні з їх значеннями на вході і вимірюється в неперах (Нп). β - коефіцієнт фази, він відображає зміну фази напруги та струму і вимірюється в радіанах (рад).

Порядок виконання роботи

1. В середовищі Electronics Workbench відкрити файл *LR12.ca4*.
2. Зібрати коло, схема якого зображена на рис. 12.4. Номер чотириполосника (A1 - A4) для кожної бригади задає викладач.
3. Виконати досліди, результати яких записати в табл. 12.1:
 - а) прямого холостого ходу (від'єднати резистор);
 - б) прямого короткого замикання (закоротити резистор);

в) зворотного холостого ходу (розвернути чотириполосник на 180° та від'єднати резистор);

г) зворотного короткого замикання (розвернути чотириполосник на 180° та закоротити резистор).

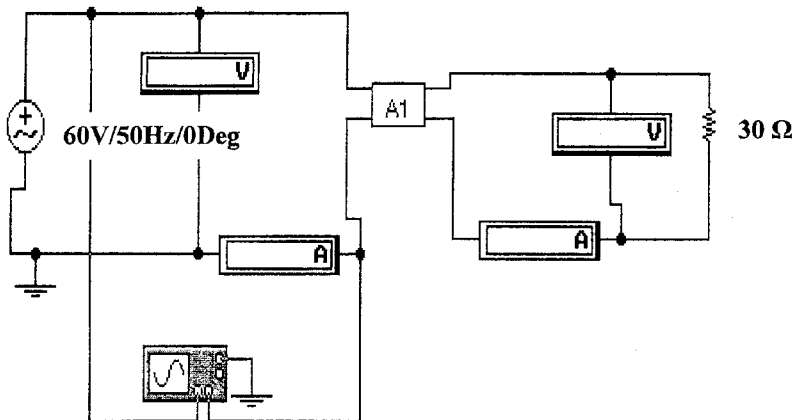


Рисунок 12.4

4. Виміряти величини, вказані в табл. 12.1 для одного значення активного навантаження, що підімкнене до виходу чотириполосника.

Таблиця 12.1

Досліди	U_1 , В	I_1 , А	Δt , сек. φ_1 , град.	U_2 , В	I_2 , А
Прямого х.х.			_____		
Прямого к.з.			_____		
Зворотного х.х.			_____		
Зворотного к.з.			_____		
Режим навантаження (дослід)			_____		
Режим навантаження (розрах.)					

Примітка. Кут зсуву фаз визначається за допомогою осцилографа (див. підрозділ 1.5 інструкції для використання Electronics Workbench).

Оброблення результатів дослідів

1. Розрахувати за даними п.3 первинні параметри чотириполосника і перевірити правильність їх визначення за рівнянням: $A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$.

2. Розрахувати вторинні параметри: характеристичні опори Z_{C1} та Z_{C2} , коефіцієнти (розповсюдження γ , згасання α та фази β).

3. Скориставшись знайденими значеннями параметрів A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} та вихідними величинами \underline{U}_2 та \underline{I}_2 , які виміряні в п.4 досліді, за рівняннями чотириполосника (12.1) обчислити комплексні напруги \underline{U}_2 та струму \underline{I}_2 на вході кола. Результати розрахунку порівняти з даними досліді.

4. Розрахувати опори та провідності Т- та П-подібних схем заміщення чотириполосника.

5. Після розрахунку Т- та П-подібних схем заміщення для вашого чотириполосника порівняйте результати розрахунку з його внутрішньою схемою, яку можна подивитися, двічі натиснувши мишею на його зображення.

Контрольні запитання

1. Що називається чотириполосником?
2. Мета даної лабораторної роботи.
3. Якими параметрами характеризуються чотириполосники? Які з них визначаються в цій лабораторній роботі?
4. Яке співвідношення пов'язує між собою параметри чотириполосника?
5. Як знаходять параметри холостого ходу та короткого замикання чотириполосника?
6. Які параметри чотириполосника називають вторинними? Як вони визначаються?

Лабораторна робота № 14wb

Трифазне коло при з'єднанні приймачів зіркою

Мета роботи: дослідити різні режими роботи приймачів енергії, з'єднаних зіркою, які споживають енергію від симетричної трифазної системи напруг.

Теоретичні положення

Систему трьох ЕРС однакової частоти та амплітуди, зсунутих за фазою на 120° , називають симетричною трифазною системою ЕРС. Для того, щоб відрізнити три ЕРС трифазного генератора, їх позначають відповідно так:

одну з ЕРС позначити \underline{E}_A , ту, що відстає від неї на 120° прийнято позначати \underline{E}_B , а ту що випереджає на $120^\circ - \underline{E}_C$ (рис. 14.1).

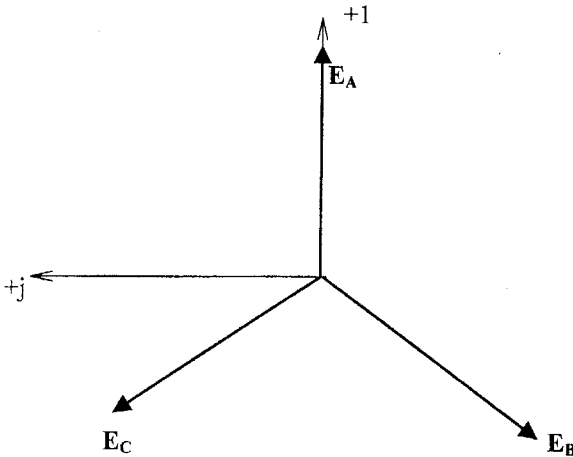


Рисунок 14.1

Сукупність трифазної системи ЕРС, трифазного навантаження та з'єднувальних проводів називається трифазним колом. Під фазою трифазного кола розуміють ділянку, по якій протікає один і той же струм. Обмотки генератора з'єднують зіркою або трикутником. При з'єднанні зіркою до початків обмоток генератора А, В, С приєднують три лінійних провідники, які йдуть до навантаження. Кінці обмоток X, Y, Z об'єднують у вузол, який називається нейтраллю генератора або його нульовою точкою. В чотирипровідному трифазному колі до нейтралі генератора приєднують нейтральний (нульовий) провід. В трипровідній системі він відсутній. З'єднання, зображене на рис. 14.2. називається з'єднанням зіркою з нульовим проводом і позначається Y_0/Y_0 . Напруги між фазним виводом і нейтральною точкою генератора або навантаження, називаються фазними: $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ – напруги на фазах генераторів; $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ – фазні напруги навантаження. Напруги між лінійними провідниками називаються лінійними; їх комплексні дорівнюють різницям між комплексами фазних напруг:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (14.1)$$

З векторної діаграми напруг на клеммах генератора випливає, що при симетричній системі фазних напруг діюче (амплітудне) значення лінійної напруги більше відповідного значення фазної в $\sqrt{3}$ разів:

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

Слід звернути увагу на те, що напрямки стрілок, якими позначають напруги в схемі (рис. 14.2) і векторній діаграмі (рис. 14.4) – протилежні. Наприклад, вектор фазної напруги генератора \underline{U}_A на схемі має напрямок від точки А до точки 0, а на діаграмі – від точки 0 до точки А; вектор лінійної напруги \underline{U}_{AB} має напрямок на діаграмі від точки В до точки А. Це означає, що всі напруги показані на діаграмі, зсувені за фазою відносно тих же напруг на схемі на 180° . При цьому зсуви за фазою між будь-якими парами напруг на діаграмі або схемі залишаються однаковими. Зсув на 180° на діаграмі влаштовують для зручності побудови діаграм та надання їм більшої наочності. Усе сказане відноситься також до векторних діаграм струмів.

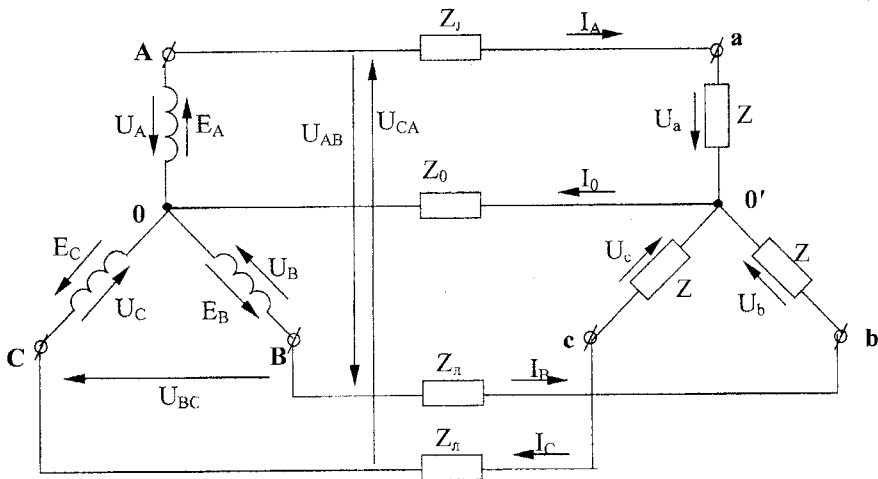


Рисунок 14.2

При з'єднанні генератора і приймача зіркою (рис. 14.2) по одній з обмоток генератора, відповідному їй лінійному провіднику і фазному опору приймача протікає один і той же струм. Тому лінійний струм (струм в лінійному провіднику) дорівнює фазному: $I_l = I_\phi$. Комплекс струму в нейтральному провіднику дорівнює алгебраїчній сумі комплексів лінійних струмів:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (14.2)$$

При рівномірному навантаженні фаз лінійні струми створюють симетричну систему, тому $\underline{I}_0 = 0$; при нерівномірному навантаженні в провіднику протікає струм.

Напруга між вузлами 00', яку називають напругою зміщення нейтралі, така:

$$\underline{U}_{00'} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_0}, \quad (14.3)$$

де $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C, \underline{Y}_0$ – комплекси провідностей фаз кола та нейтралі.

Поки нульові точки генератора і навантаження з'єднані нульовим провідником, опором якого можна знехтувати ($\underline{Y}_0 = \infty$), комплексні потенціали цих двох точок залишаються практично однаковими за будь-яких умов навантаження ($\underline{U}_{00'} = 0$).

Якщо навантаження симетричне ($\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C$), то $\underline{U}_{00'} = 0$. В цьому випадку нульовий провідник можна видалити і це не впливає на фазні напруги навантаження. Але за відсутності нульового провідника асиметрія навантаження викликає асиметрію її фазних напруг.

Якщо опори фаз різні за характером, то напрямок вектора зміщення нейтралі залежить від послідовності фаз системи, що має велике практичне значення.

Зокрема це використовується при побудові простого фазопоказчика для визначення порядку проходження фаз, котрий складається з двох однакових ламп розжарювання та ємності (рис. 14.3). Ємність підбирають таким чином, щоб провідність її дорівнювала провідності ламп.

Якщо три клеми фазопоказчика приєднати до трьох клем симетричної трифазної системи ЕРС з прямим проходженням фаз і фазу трифазного кола, до якої ввімкнена ємність, вважати фазою А (рис. 14.3), то лампа, ввімкнена в фазу з напругою, що відстає (тобто в фазу В кола), буде горіти яскраво, а з напругою, що випереджає (тобто в фазу С) – тьмяно.

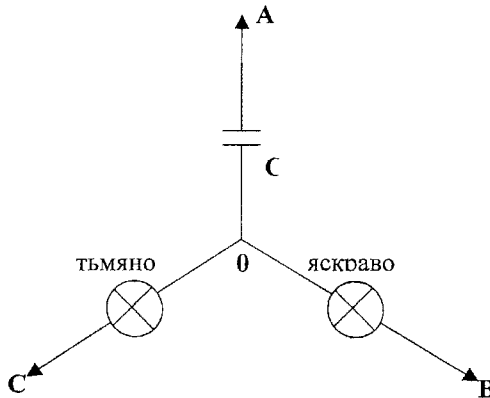


Рисунок 14.3

Побудову векторної діаграми слід починати з напруги на фазах генератора (в даній роботі напруги на фазах генератора створюють симетричну систему). На векторній діаграмі можна зобразити також лінійні напруги

генератора. Якщо $Z_n = 0$ і опорами з'єднувальних провідників можна знехтувати, то лінійні напруги генератора рівні лінійним напругам на навантаженні, тобто точки А, В та С генератора збігаються з точками а, b та с навантаження. Положення нейтральної точки $0'$ навантаження визначають як точку перетину дуг кіл, що мають радіуси $\frac{U_a}{m_u}, \frac{U_b}{m_u}, \frac{U_c}{m_u}$ і центри яких лежать в точках а, b, с (m_u – масштаб напруги на векторній діаграмі).

На рис. 14.4 зображена векторна діаграма для випадку $r_b = 0, r_a = r_c$ в трифазній схемі.

При короткому замиканні фази В напруга на цій фазі дорівнює нулю, потенціали точок В і $0'$ рівні, тобто на опорі r_a напруга $\underline{U}_a = \underline{U}_{ab}$, а на опорі r_c напруга $\underline{U}_c = \underline{U}_{cb} = -\underline{U}_{bc}$.

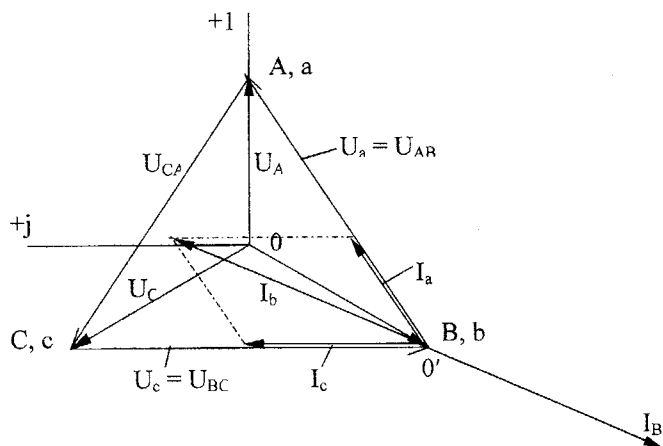


Рисунок 14.4

Таким чином, нульова точка навантаження $0'$ змістилась відносно нульової точки генератора 0 на \underline{E}_B тобто $\underline{U}_{00'} = \underline{E}_B$.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати на набірному полі схему трифазного кола при з'єднанні приймачів зіркою з нульовим провідом (рис. 14.5.).

2. Виміряти і занести до таблиці 14.1 величини для таких випадків:

а) рівномірне навантаження фаз (опір навантаження вибрати самостійно в межах 50-100 Ом);

б) нерівномірне навантаження фаз (опір навантаження змінити в межах 50-100 Ом, врахувавши, що $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$);

в) обрив проводу в одній із фаз (за вказівкою викладача), при такому самому навантаженні, як і в п. 2б.

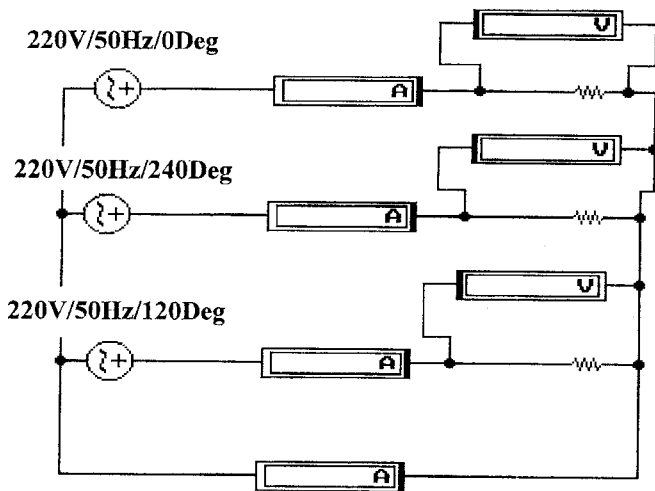


Рисунок 14.5

Таблиця 14.1

До-слід	U_a	U_b	U_c	I_a	I_b	I_c	I_0
	В			А			
2а							
2б							
2в							

3. Зібрати на набірному полі схему трифазного кола при з'єднанні приймачів зіркою без нульового проводу (рис. 14.6).

4. Виміряти і занести до таблиці 14.2 величини для таких випадків:

- рівномірне навантаження фаз (те ж саме, що і в п. 2а);
- нерівномірне навантаження фаз (те ж саме, що і в п. 2б);
- обрив проводу в одній із фаз (як і в п. 2в);
- коротке замикання приймача в одній із фаз (в тій фазі і при тому самому навантаженні, що і в п. 4в).

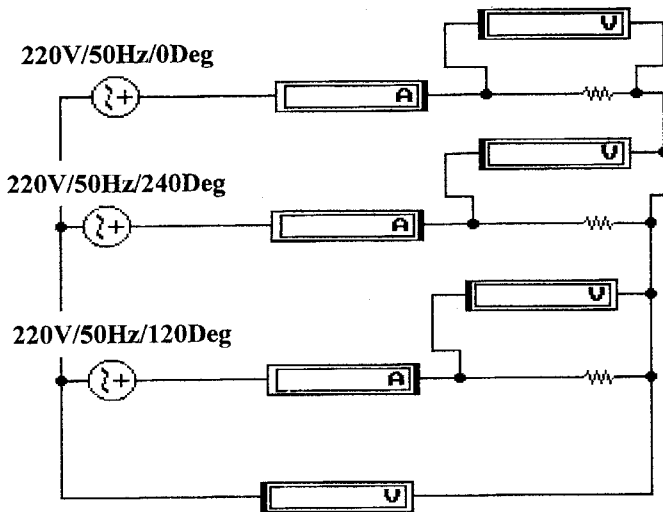


Рисунок 14.6

Таблиця 14.2

До- слід	U_a	U_b	U_c	U_0	I_a	I_b	I_c
	В				А		
4а							
4б							
4в							
4г							

Оброблення результатів

1. За результатами дослідів побудувати в масштабі векторні топографічні діаграми для кожного із досліджуваних режимів.
2. За вказівкою викладача розрахувати одне із досліджуваних кіл. Результати розрахунку порівняти з даними вимірювань.
3. Зробити висновки.

Контрольні питання

1. Що називається симетричним трифазним колом? Несиметричним?
2. Співвідношення між лінійною і фазною напругами в симетричному трифазному колі при з'єднанні приймача зіркою.
3. Як розрахувати напругу зміщення нейтралі?
4. Пояснити принцип дії описаного в лабораторній роботі фазопоказника (краще з допомогою векторної діаграми).

5. Яку роль відіграє нульовий провідник в трифазному колі?
6. Пояснити побудовані за дослідними даними векторні діаграми.

Лабораторна робота № 15wb

Трифазне коло при з'єднанні приймачів трикутником

Мета роботи: дослідити різні режими роботи приймачів енергії, з'єднаних трикутником.

Теоретичні положення

На рис. 15.1 показана схема трифазного кола трикутник – трикутник (Δ - Δ). При з'єднанні приймача трикутником його опори Z_{ab} , Z_{bc} і Z_{ca} приєднують безпосередньо до лінійних провідників, внаслідок чого лінійні напруги одночасно є фазними напругами приймачів: $U_L = U_\phi$.

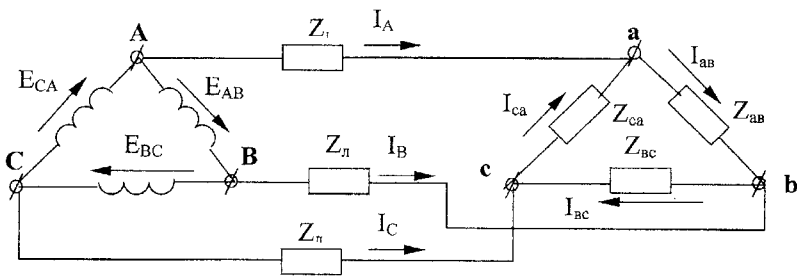


Рисунок 15.1

Фазні струми приймачів визначають за законом Ома:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; \quad I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; \quad I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}. \quad (15.1)$$

За першим законом Кірхгофа для вузлів a, b, c – маємо

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_B = I_{bc} - I_{ab}; \quad I_C = I_{ca} - I_{bc}. \quad (15.2)$$

Якщо навантаження рівномірне, а система ЕРС симетрична, то фазні струми приймача створюють симетричну систему струмів, як це наведено на рис. 15.2. Вектори лінійних струмів відстають від відповідних фазних на 30° .

Із трикутників, створених векторами фазних і лінійних струмів (наприклад $0df$), видно, що в цьому випадку діюче значення лінійного струму більше діючого значення фазного в $\sqrt{3}$ раз: $\frac{I_L}{I_\phi} = \sqrt{3}$.

На рис. 15.3 зображена суміщена векторна діаграма струмів і напруг при з'єднанні навантаження трикутником для випадку, коли в фазу b-c навантаження ввімкнена ємність, в двох інших фазах – активні опори, причому $r_{ab} = r_{bc} = |x_{bc}|$; $Z_{bc} = -jx_{bc}$.

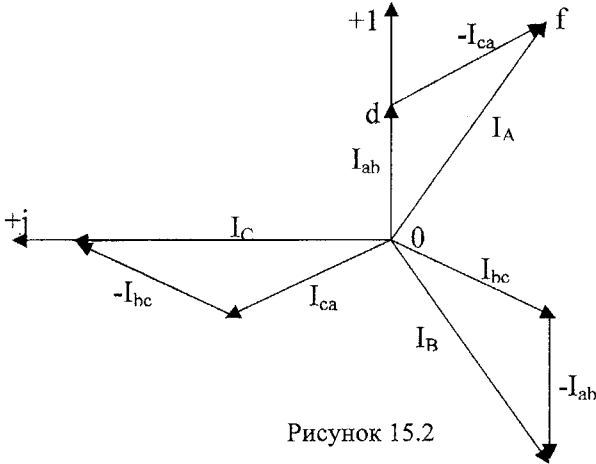


Рисунок 15.2

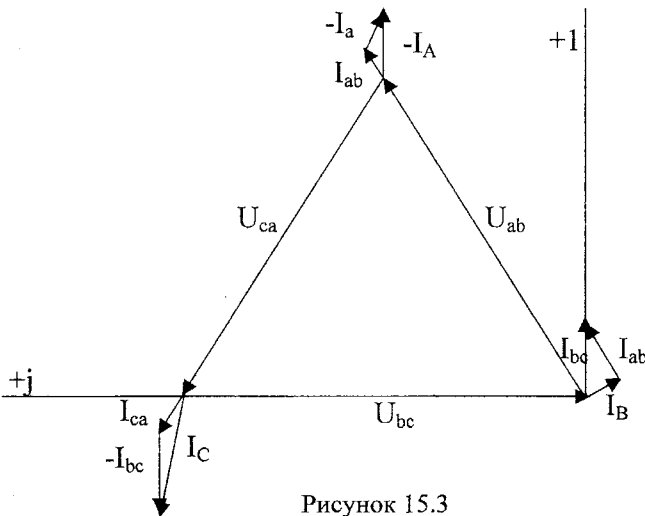


Рисунок 15.3

Порядок виконання роботи

1. Зібрати на набірному полі схему трифазного кола при з'єднанні приймачів трикутником (рис. 15.4).

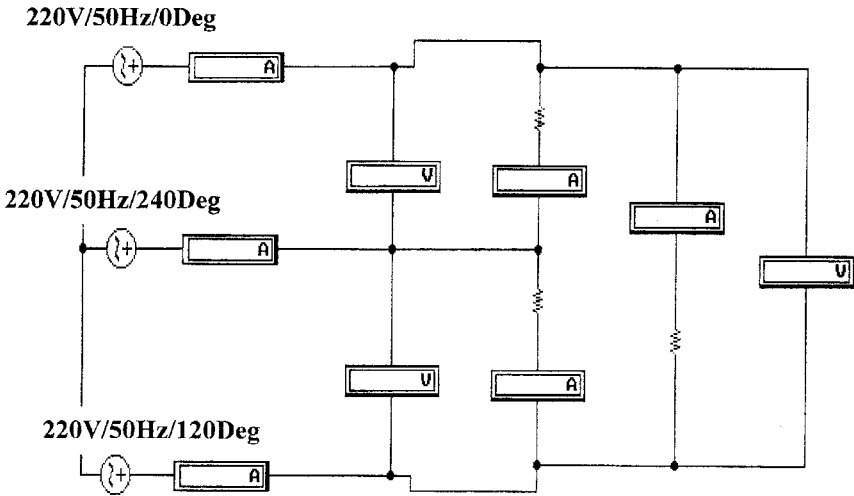


Рисунок 15.4

2. Виміряти і занести до таблиці 15.1 величини для таких випадків:
 - а) рівномірне навантаження фаз (опір навантаження вибрати за вказівкою викладача в межах 50-100 Ом);
 - б) обрив лінійного проводу в одній із фаз (за вказівкою викладача), при такому самому навантаженні, що і в п. 2а;
 - в) вимкнення одного з приймачів (за вказівкою викладача), при такому самому навантаженні, що і в п. 2а;
 - г) нерівномірне навантаження фаз (опір навантаження змінити в межах 50-100 Ом, врахувавши, що $r_{ab} = r_{bc} = r_{ca}$).
3. В одну із фаз замість резистора під'єднати ємність (за вказівкою викладача в межах 40-80 мкФ). Провести вимірювання і занести результати в табл. 15.1.

Оброблення результатів

1. За результатами вимірювань для кожного досліді побудувати в масштабі суміщені векторні діаграми струмів і напруг.
2. За вказівкою викладача розрахувати одне із досліджуваних кіл. Результати розрахунку занести в табл. 15.1 і порівняти з даними вимірювань.
3. Зробити висновки.

Таблиця 15.1

До- слід	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}
	В			А					
2а									
2б									
2в									
2г									
3									
Розр.									

Контрольні питання

1. Що називається симетричним трифазним колом? Несиметричним?
2. Співвідношення між лінійною і фазною напругами в симетричному трифазному колі при з'єднанні приймача трикутником.
3. Пояснити побудовані за дослідними даними векторні діаграми.

Лабораторна робота № 16

Перехідні процеси в лінійних електричних колах

Мета роботи: дослідити перехідні процеси в нерозгалужених колах першого та другого порядків.

Теоретичні положення

Процес переходу електричного кола від одного сталого режиму до другого, який характеризується новим енергетичним станом, називається перехідним.

Зміну режиму роботи кола, що веде до зміни її енергетичного стану, називають комутацією. До комутації відносяться: вмикання, вимикання, замикання на ділянках кола і т.п. Прийнято вважати, що комутація проходить миттєво. В загальному випадку процеси переходу від одного енергетичного стану кола до другого не можуть проходити миттєво, тому що неможливі миттєві зміни енергії, що є в реактивних елементах кола.

При розгляді перехідних процесів, відрахунок часу ($t = 0$) ведеться з моменту комутації.

Енергія магнітного поля котушки з індуктивністю L та електричного поля конденсатора з ємністю C визначається співвідношеннями:

$$W_L = \frac{Li_L^2}{2}; \quad W_C = \frac{Cu_C^2}{2}. \quad (16.1)$$

Оскільки миттєві зміни енергії W_L і W_C неможливі, неможливі також стрибки струму в індуктивності і напруги на ємності.

Це положення визначає закони комутації, котрі записуються так:

$$i_L(0_-) = i_L(0_+); \quad u_C(0_-) = u_C(0_+); \quad (16.2)$$

де $i_L(0_-)$, $u_C(0_-)$ – струм в індуктивності і напруга на ємності в момент $t < 0$ до комутації; $i_L(0_+)$, $u_C(0_+)$ – ті ж величини в момент безпосередньо після комутації.

Аналітичні залежності струмів та напруг на різних ділянках кола під час перехідних процесів можна отримати, якщо розв'язати складені за законами Кірхгофа диференціальні рівняння для часу $t \geq 0$.

Розглянемо аналітично перехідні процеси, які експериментально визначаються в даній лабораторній роботі.

Перехідний процес в колі $r - C$ (рис. 16.1)

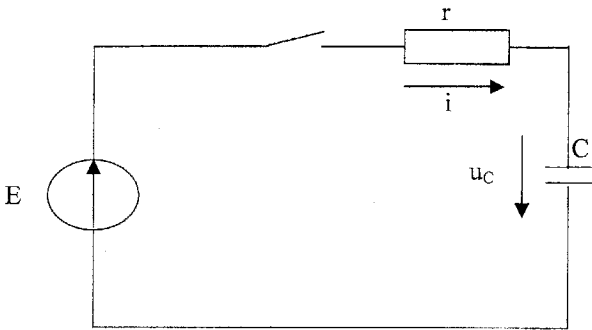


Рисунок 16.1

Запишемо для кола $r - C$, що вмикається до постійної ЕРС – E , рівняння за другим законом Кірхгофа для $t \geq 0$:

$$ir + u_C = E.$$

Враховуючи, що $i = C \frac{du_C}{dt}$, отримаємо:

$$rC \frac{du_C}{dt} + u_C = E \quad (16.3)$$

Розв'язання цього диференціального рівняння першого порядку складається з двох частин:

$$u_C = u_{Cnp} + u_{Cв}, \quad (16.4)$$

де u_{Cnp} – примусова складова напруги; $u_{Cв}$ – вільна складова.

Примусова складова визначається як напруга на ємності після закінчення перехідного процесу. В даному випадку ємність буде заряджатись до тих пір, поки напруга на ній не стане рівною E , тобто

$$u_{Cnp} = E. \quad (16.5)$$

Вільна складова знаходиться за формулою:

$$u_{Cs} = Ae^{pt}, \quad (16.6)$$

де p – корінь характеристичного рівняння: $rCp + 1 = 0$, звідки $p = -\frac{1}{rC}$,

A – стала інтегрування, яка визначається з початкових умов.

Таким чином можна записати:

$$u_C = E + Ae^{pt}. \quad (16.7)$$

Вважаючи, що ємність в момент комутації ($t = 0$) не була заряджена, тобто $u_C(0) = 0$, отримаємо:

$$u_C(0) = 0 = E + A, \quad (16.8)$$

звідки $A = -E$.

Остаточна напруга на ємності як функція часу має вигляд:

$$u_C(t) = E - Ee^{-\frac{1}{rC}t} = E(1 - e^{-\frac{1}{rC}t}). \quad (16.9)$$

Позначимо $rC = \tau$, де τ називають сталою часу перехідного процесу, тоді

$$u_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (16.10)$$

Графічно ця залежність зображена на рис. 16.2

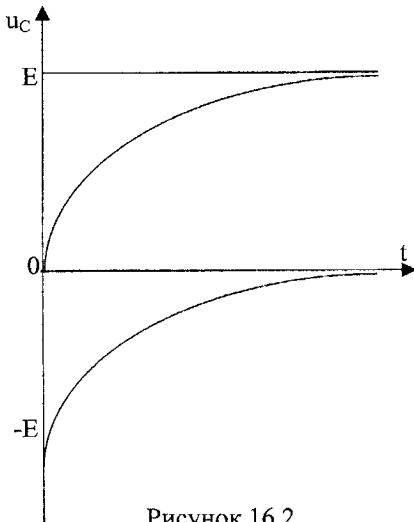


Рисунок 16.2

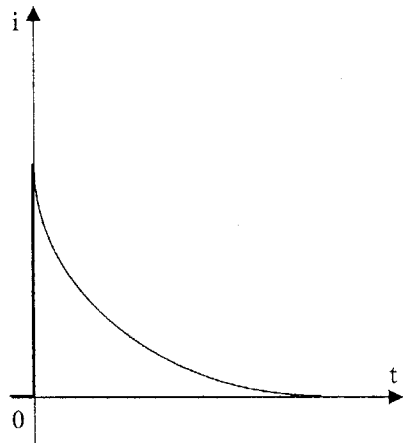


Рисунок 16.3

З отриманого розв'язку та графіка на рис. 16.2 видно, що напруга на ємності поступово зростає до E і тим швидше, чим менша τ . Стала часу графічно може бути визначена як довжина піддотичної (з урахуванням масштабу часу).

Струм в колі $r - C$ при заряді конденсатора

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (16.11)$$

Графік струму показаний на рис. 16.3. З нього видно, що в момент комутації струм стрибком змінюється від нуля до величини E/r , а потім зменшується за експоненціальним законом.

При вмиканні кола $r - L$ на постійну напругу графік струму $i(t)$ має такий самий вигляд, як $u_C(t)$ в колі $r-C$, а графік $u_L(t)$ – як $i(t)$ в колі $r-C$.

Перехідний процес в колі $r - L - C$ (рис. 16.4)

У відповідності з другим законом Кірхгофа рівняння для кола буде

$$ir + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt + u_C = E. \quad (16.12)$$

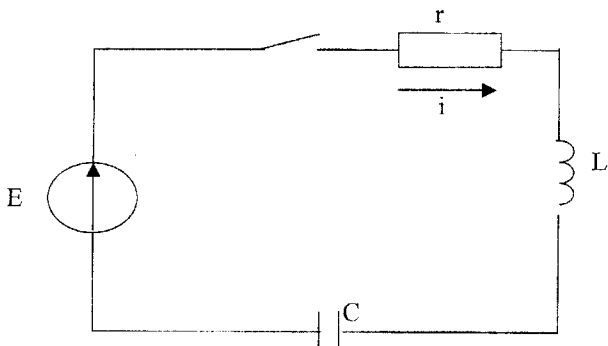


Рисунок 16.4

Після диференціювання отримаємо рівняння другого порядку:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0. \quad (16.13)$$

Характеристичне рівняння

$$p^2 + \frac{r}{L} p + \frac{1}{LC} = 0 \quad (16.14)$$

має корені

$$p_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (16.15)$$

В залежності від співвідношення складових під знаком радикала будемо мати три види коренів:

- $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$ — корені дійсні різні;
- $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}$ — корені комплексні;
- $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$ — корені дійсні рівні.

В першому випадку процес в колі r - L - C буде аперіодичним (неколивальним). Вираз для струму в колі має вигляд

$$i = i_g = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (16.16)$$

Графіки струму i , напруги на ємності u_C та індуктивності u_L показані на рис. 16.5.

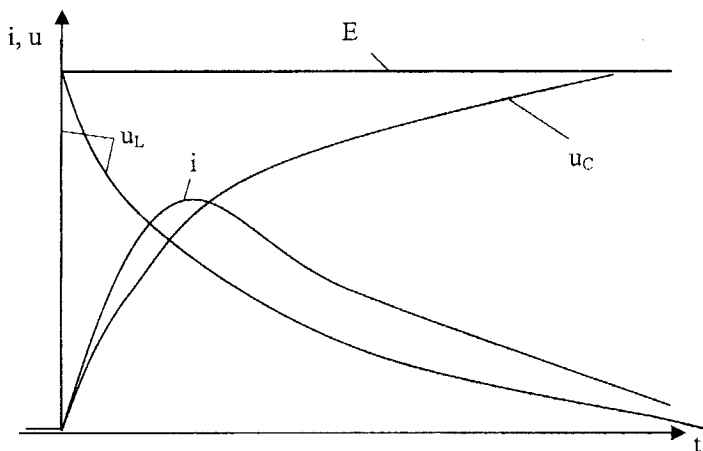


Рисунок 16.5

В другому випадку корені характеристичного рівняння

$$p_1 = -\delta + j\omega; \quad p_2 = -\delta - j\omega$$

тобто процес в колі є періодичним (коливальним).

Рівняння струму має вигляд

$$i = I_m e^{-\delta t} \sin \omega t, \quad (16.17)$$

$$\text{де } \delta = \frac{r}{2L}; \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}.$$

З рівняння та графіків (рис. 16.6) випливає, що струм i , а також напруги u_C і u_L , змінюються за законом затухаючої синусоїди.

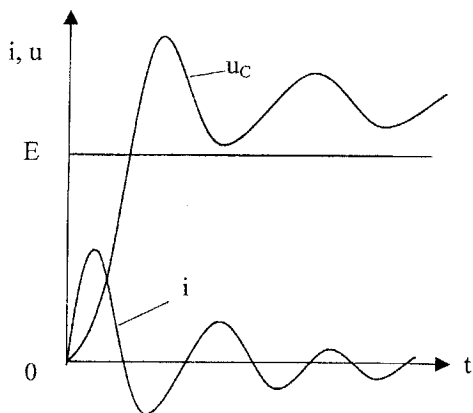


Рисунок 16.6

Якщо корені однакові, тобто $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$, то перехідний процес є критичним (рис. 16.7). Він перехідний між аперіодичним та коливальним процесами.

Опір $r_{кр}$ в цьому режимі називається критичним.

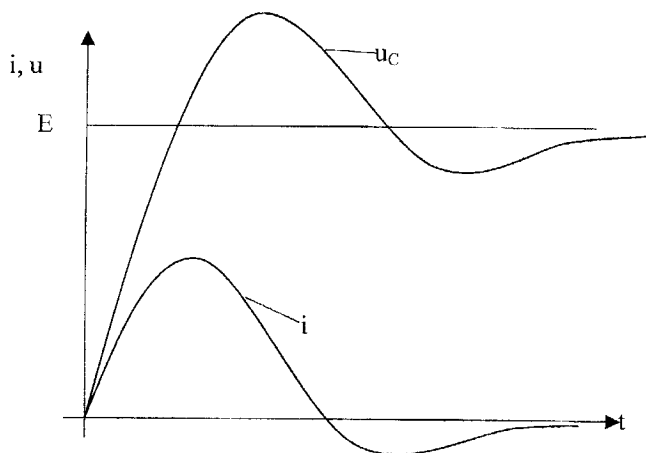


Рисунок 16.7

Лабораторна робота № 16Awb

Перехідні процеси в лінійних електричних колах першого порядку

Мета роботи: дослідити перехідні процеси в нерозгалужених колах першого порядку.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати на набірному полі схему (рис. 16A.1). Значення параметрів прийняти згідно з таблицею варіантів (табл. 16A.1). Номер варіанта задає викладач. Параметри функціонального генератора наведені на рис. 16A.2.

Таблиця 16A.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
$L, мГн$	20	25	30	35	40	40	45	50
$R, Ом$	500	450	400	350	300	250	250	200

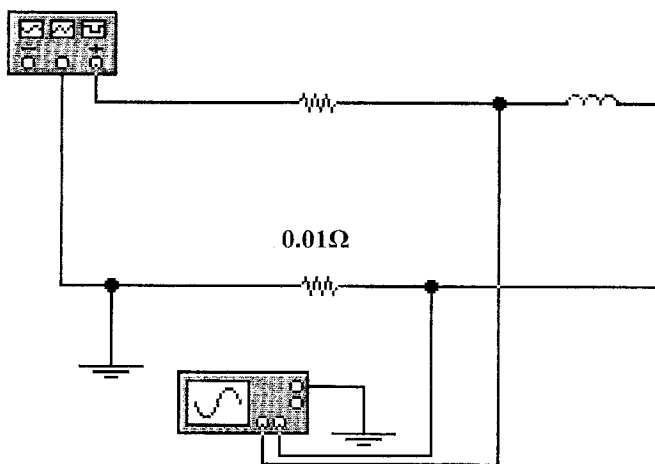


Рисунок 16A.1

2. За допомогою двохпроменевого осцилографа зняти криві напруги та струму на індуктивності.

3. Роздрукувати електричну схему, параметри та осцилограми.

4. Зібрати на набірному полі схему (рис. 16A.3). Значення параметрів прийняти згідно з таблицею варіантів (табл. 16A.2). Номер варіанта задає викладач. Параметри функціонального генератора наведені на рис. 16A.2.

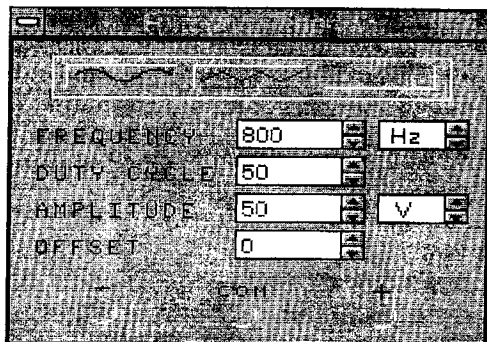


Рисунок 16А.2

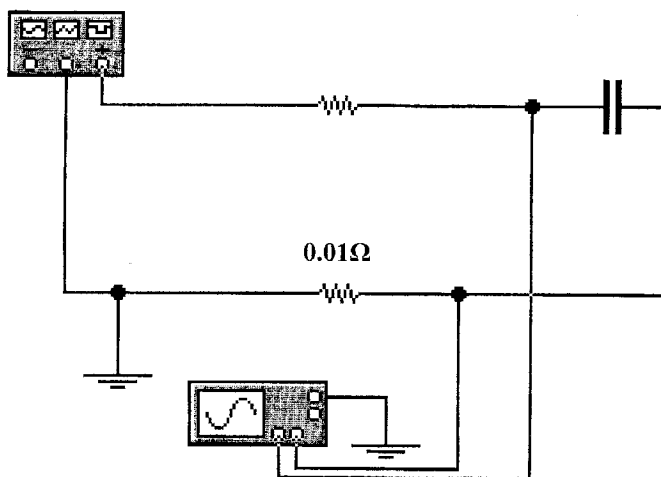


Рисунок 16А.3

Таблиця 16А.2

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
$C, \text{нФ}$	50	55	60	65	70	70	75	80
$R, \text{Ом}$	500	450	400	350	300	250	250	200

5. За допомогою двопроменевого осцилографа зняти криві напруги та струму на смності.
6. Роздрукувати електричну схему, параметри та осцилограми.

Оброблення результатів дослідів

1. Розрахувати перехідні струми та напруги для заданих кіл.
2. За результатами розрахунків побудувати графіки та порівняти їх з кривими отриманими при моделюванні на ЕОМ.
3. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які причини виникнення перехідних процесів?
2. Закони комутації.
3. Мета даної лабораторної роботи.
4. Що таке стала часу перехідного процесу?
5. Як визначаються залежні початкові умови?

Лабораторна робота № 16Бвб

Перехідні процеси в лінійних електричних колах другого порядку

Мета роботи: дослідити перехідні процеси в нерозгалужених колах другого порядку.

Порядок виконання роботи

1. Для варіанта значень L , C , заданих викладачем (табл. 16Б.1), визначити критичне значення активного опору $r_{кр}$

Таблиця 16Б.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
$L, мГн$	50	55	60	65	70	75	75	80
$C, нФ$	50	50	45	40	35	35	30	30

2. Зібрати на набірному полі схему (рис. 16Б.1). Параметри функціонального генератора наведені на рис. 16Б.2.

3. За допомогою двопроменевого осцилографа зняти криві напруги на ємності та струму в колі для трьох значень R :

- $R = r_{кр}$
- $R = 2r_{кр}$
- $R = 0.5r_{кр}$

4. Роздрукувати електричну схему, параметри та осцилограми.

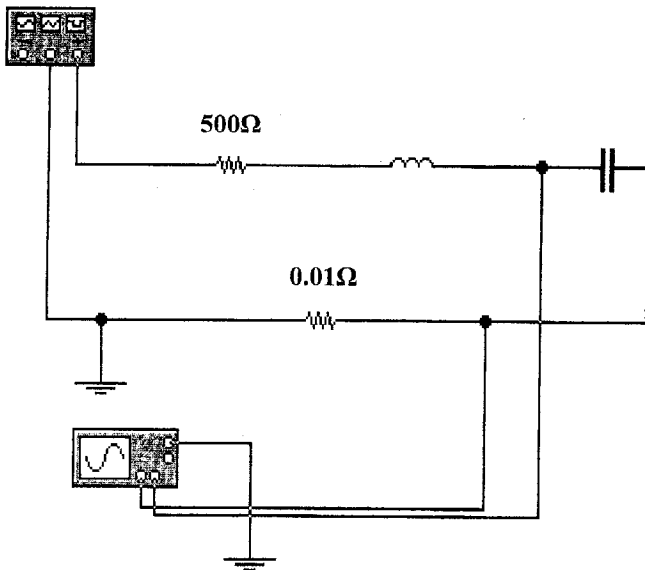


Рисунок 16Б.1

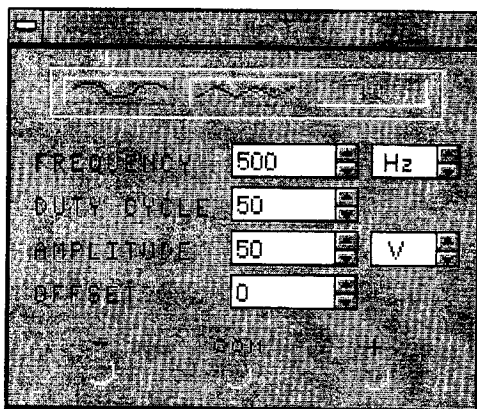


Рисунок 16Б.2

Обробка результатів дослідів

1. Розрахувати перехідні напругу на ємності та струм в колі.

2. За результатами розрахунків побудувати графіки та порівняти їх з кривими отриманими при моделюванні на ЕОМ.

3. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які причини виникнення перехідних процесів?
2. Чим визначається порядок диференціального рівняння для розрахунку перехідного процесу?
3. Мета даної лабораторної роботи.
4. Чи може бути додатним хоча б один з коренів характеристичного рівняння?
5. Як визначаються залежні початкові умови?

Лабораторна робота № 16Вwb

Перехідні процеси в електричних колах при довільних збудженнях

Мета роботи: дослідження перехідних процесів в електричних колах при довільних збудженнях

Теоретичні положення

При розрахунку перехідних процесів при довільних збудженнях широко використовуються перехідні і імпульсні характеристики. Для одержання поняття про ці характеристики розглянемо спочатку одиничну східчасту функцію $1(t)$ (рис. 16В.1). Цю функцію інакше називають *функцією Хевісайда*.

$$1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0, \\ 1 & t \geq 0. \end{cases} \quad (16В.1)$$

За допомогою цієї функції може бути описано вмикання джерела довільної е.р.с. в момент $t = 0$

$$e_{вм}(t) = 1(t)e(t) \quad (16В.2)$$

Якщо одинична східчаста функція діє не в момент $t=0$, а зміщена на час τ (рис. 2), то вона записується як

$$1(t-\tau) = \begin{cases} 0 & t < \tau, \\ 1 & t \geq \tau. \end{cases} \quad (16В.3)$$

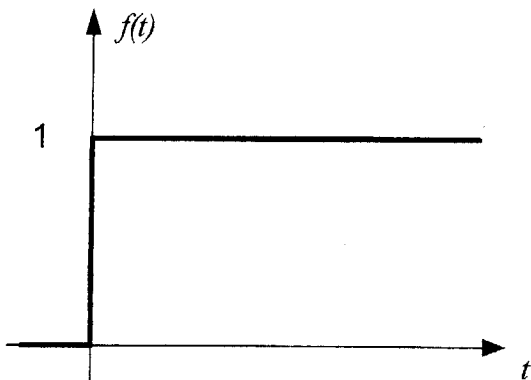


Рисунок 16В.1

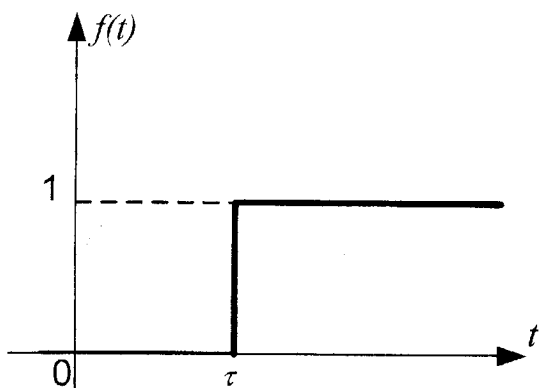


Рисунок 16В.2

Реакцію кола на одиничний східчастий сигнал називають *перехідною характеристикою* і позначають $h(t)$.

Так, наприклад, при вмиканні R - L кола, струм визначається за допомогою виразу $i = \frac{U}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right)$.

$$i = \frac{U}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right)$$

Якщо прийняти $U = 1$ В, то перехідна характеристика для цього кола буде

$$h(t) = \frac{1}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right). \quad (16В.4)$$

В загальному випадку перехідна характеристика визначається в операторній формі. Якщо зобразити коло в вигляді чотириполосника, наведеного на рис. 16В.3, де на вході кола є деякий сигнал $f(t)$, а реакція кола на цей сигнал є $x(t)$, то зв'язок між ними в операторній формі записується в вигляді:

$$X(s) = K(s) \cdot F(s), \quad (16В.5)$$

де $K(s)$ – передавальна функція кола.

Якщо дія на коло є одиничною східчастою функцією, тобто $F(s) = \frac{1}{s}$, то в цьому випадку одержуємо операторне зображення перехідної характеристики

$$H(s) = \frac{K(s)}{s}. \quad (16В.6)$$

Необхідно відмітити, що перехідна характеристика завжди визначається для нульових початкових умов.

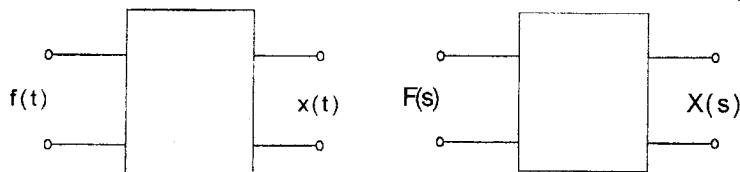


Рисунок 16В.3

Приклад 1

Знайти перехідну характеристику для напруги на ємності (рис. 16В.4, а).

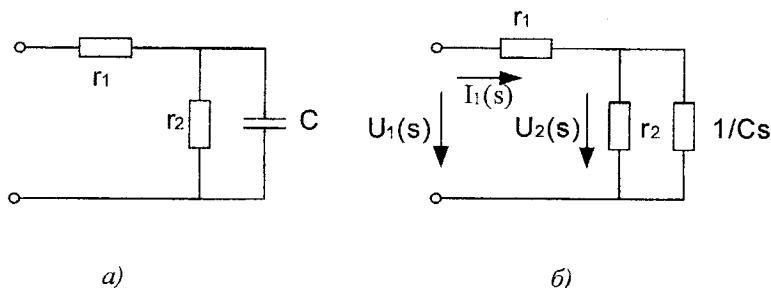


Рисунок 16В.4

Зобразимо вихідну схему в операторному вигляді для нульових початкових умов (рисунок 16В.4, б) і виразимо шукану напругу $U_2(s)$ через вхідну напругу $U_1(s)$.

Знаходимо спочатку вхідний струм

$$I_1(s) = \frac{U_1(s)}{r_1 + \frac{r_2 \frac{1}{sC}}{r_2 Cs + 1}} = \frac{U_1(s)(r_2 Cs + 1)}{r_1 r_2 Cs + r_1 + r_2}.$$

Шукана напруга

$$U_2(s) = I_1(s) \frac{r_2 \frac{1}{sC}}{r_2 + \frac{1}{sC}} = I_1(s) \frac{r_2}{r_2 sC + 1} = \frac{U_1(s) r_2}{r_1 r_2 Cs + r_1 + r_2}.$$

Передавальна функція кола

$$K(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{r_2}{r_1 r_2 Cs + r_1 + r_2}.$$

Зображення перехідної характеристики у відповідності з (16В.6)

$$H(s) = \frac{r_2}{s(r_1 r_2 Cs + r_1 + r_2)}.$$

Використовуючи теорему розкладання, знаходимо оригінал перехідної характеристики

$$h(t) = \frac{r_2}{r_1 + r_2} \left(1 - e^{-\frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2 C} t} \right)$$

Розрахунок реакції електричного кола на довільне збудження $u(t)$ (графік функції $u(t)$ наведено на рис. 16В.5) проводять за виразом

$$x(t) = U_0 h(t) + \int_0^t u'(\tau) h(t - \tau) d\tau,$$

де $u(t)$ – напруга на вході кола, U_0 – значення цієї напруги при $t=0$, $h(t)$ – перехідна характеристика кола, $u(\tau)$ – значення похідної від вхідної напруги в якій змінна t замінена на змінну τ , $h(t-\tau)$ – перехідна характеристика кола, в якій змінна t замінена на змінну $t-\tau$.

Цей вираз називають інтегралом накладання або інтегралом Дюамеля.

Приклад 2

Визначити закон зміни напруги на ємності (рис. 16В.6, а) при дії на коло експоненційної напруги $u(t) = Ue^{-\beta t}$.

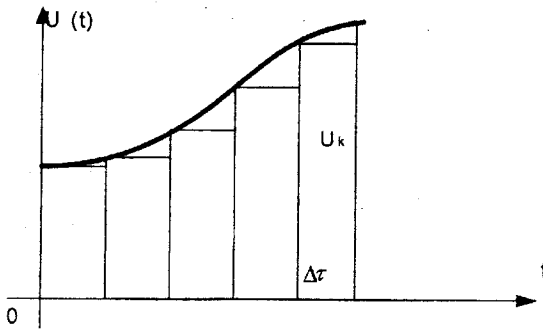


Рисунок 16В.5

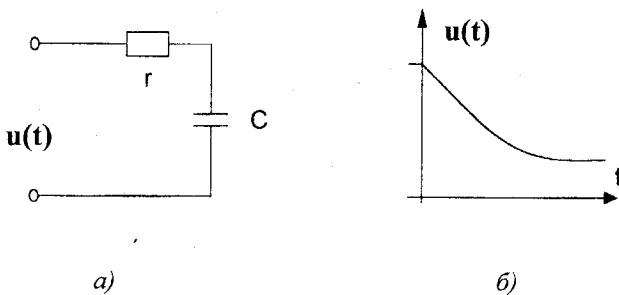


Рисунок 16В.6

Перехідна характеристика для напруги на ємності $h(t) = 1 - e^{-\alpha t}$,
де $\alpha = \frac{1}{rC}$.

Визначасмо всі величини, які входять в інтеграл Дюамеля:

$$U_0 = U, \quad u'(t) = -\beta U e^{-\beta t}, \quad h(t) = 1 - e^{-\alpha t}, \quad h(t - \tau) = 1 - e^{-\alpha(t - \tau)}$$

В результаті одержуємо:

$$\begin{aligned} u_c(t) &= U(1 - e^{-\alpha t}) + \int_0^t (-\beta U e^{-\beta \tau})(1 - e^{-\alpha(t - \tau)}) d\tau = \\ &= U(1 - e^{-\alpha t}) - \beta U \left(\int_0^t e^{-\beta \tau} d\tau - \int_0^t e^{-\alpha \tau} e^{(\alpha - \beta)\tau} d\tau \right) = \\ &= U(1 - e^{-\alpha t}) - \beta U \left(\frac{1}{-\beta} e^{-\beta \tau} \Big|_0^t - e^{-\alpha t} \frac{1}{\alpha - \beta} e^{(\alpha - \beta)\tau} \Big|_0^t \right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= U(1 - e^{-\alpha t}) - \beta U \left\{ \frac{1}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) - \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha - \beta} (e^{(\alpha - \beta)\tau} - 1) \right\} = \\
 &= U(1 - e^{-\alpha t}) - U(1 - e^{-\beta t}) + \frac{\beta U}{\alpha - \beta} (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) = \\
 &= U - Ue^{-\alpha t} - U + Ue^{-\beta t} + \frac{\beta U}{\alpha - \beta} e^{-\beta t} - \frac{\beta U}{\alpha - \beta} e^{-\alpha t} = \\
 &= \frac{\alpha U}{\alpha - \beta} (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}).
 \end{aligned}$$

Порядок виконання роботи

1. За вказівкою викладача зібрати на набірному полі одну з двох схем (рис. 16В.7, рис. 16В.8). Значення параметрів прийняти згідно з таблицею варіантів (табл. 16В.1). Номер варіанта задає викладач.

Таблиця 16В.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
L, мГн	50	55	60	65	70	75	75	80
C, мкФ	100	100	100	120	120	140	150	160
R, Ом	10	15	20	20	25	25	30	30

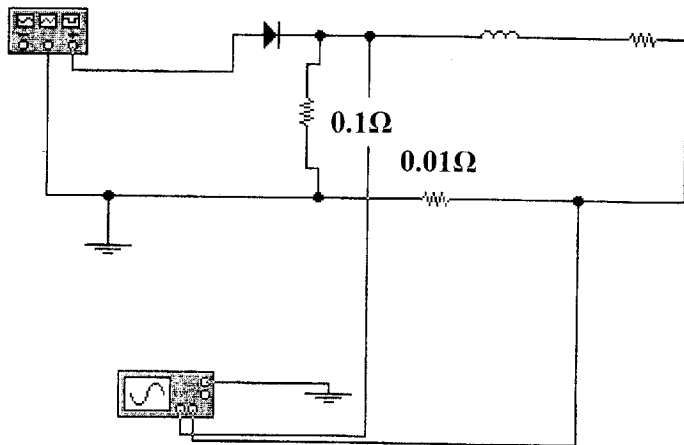


Рисунок 16В.7

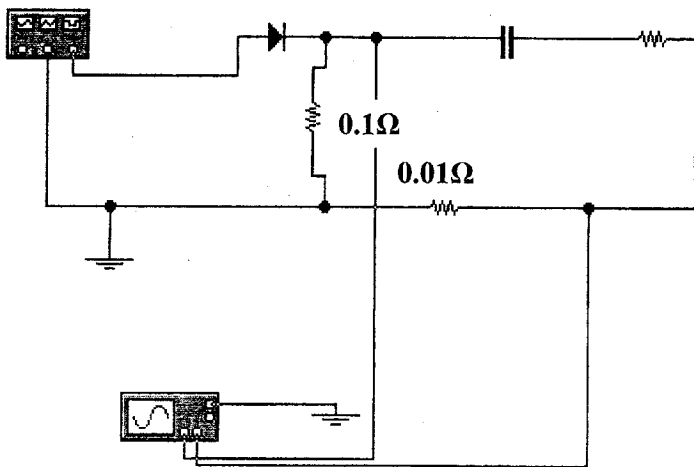
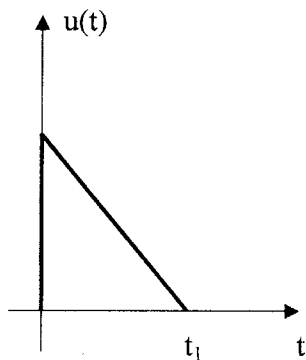
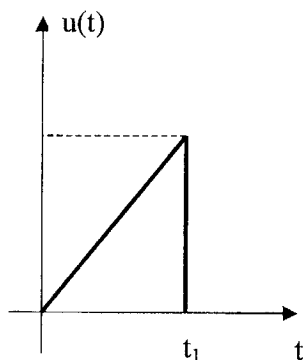


Рисунок 16B.8

2. За вказівкою викладача задати на функціональному генераторі (рис. 16B.10, а, б) одну з двох форм вхідної напруги (рис. 16B.9, а, б)

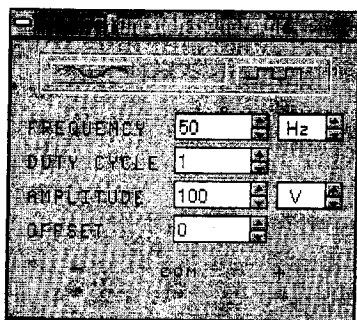


а)

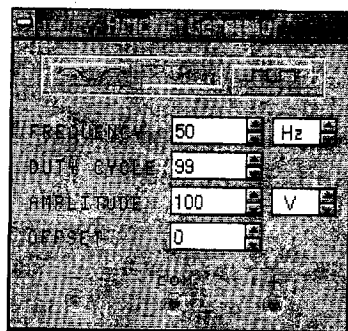


б)

Рисунок 16B.9



a)



б)

Рисунок 16В.10

3. За допомогою двопроменевого осцилографа зняти криві вхідної напруги та реакції кола.
4. Роздрукувати електричну схему, параметри та осцилограми вхідного та вихідного сигналів.

Оброблення результатів дослідів

1. Розрахувати перехідну характеристику для заданого електричного кола.
2. Записати аналітичний вираз вхідного сигналу.
3. За допомогою інтеграла Дюамеля провести аналітичний розрахунок реакції кола (вихідного сигналу).
4. За результатами розрахунків побудувати графіки вхідного та вихідного сигналів та порівняти їх з кривими отриманими при моделюванні на ЕОМ.
5. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Що називається одиничною східчастою функцією?
2. Як знаходиться перехідна характеристика кола?
3. Як знаходиться імпульсна характеристика кола?
4. Мета даної лабораторної роботи.
5. Як розрахувати перехідний процес для довільного вхідного сигналу при ненульових початкових умовах?

Електричні кола при несинусоїдних струмах і напругах

Мета роботи: дослідження процесів в електричних колах при несинусоїдних струмах і напругах

Теоретичні положення

Наявність в електричних колах джерел енергії, напруга яких хоч і періодична, але відрізняється від гармонічної (рис. 28.1), не дозволяє для розрахунку таких кіл використовувати безпосередньо метод комплексних амплітуд. Тому, звичайно, періодичну несинусоїдну функцію зображають у вигляді ряду Фур'є.

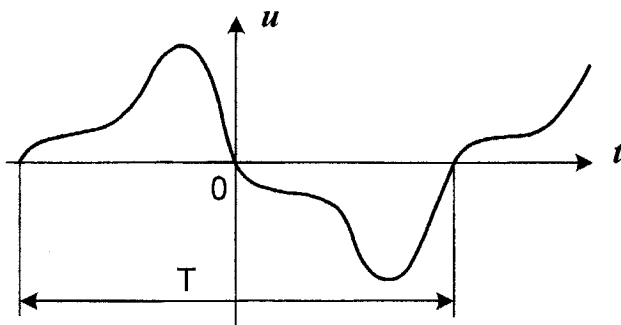


Рисунок 28.1

Відомо, що будь-яка періодична функція $f(x)$, яка задовольняє умови Діріхле, тобто якщо період функції може бути розбитий на скінченне число інтервалів, в кожному із яких $f(x)$ безперервна і монотонна, і в усякій точці розриву $f(x)$ існує $f(x+0)$ і $f(x-0)$, може бути зображена гармонічним рядом:

$$f(x) = B_0 + A_1 \sin x + B_1 \cos x + A_2 \sin 2x + B_2 \cos 2x + \dots \quad (28.1)$$

або

$$f(x) = B_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \sin kx + B_k \cos kx), \quad (28.2)$$

де коефіцієнти ряду Фур'є визначаються виразами:

$$B_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx, \quad (28.3)$$

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx dx, \quad (28.4)$$

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx. \quad (28.5)$$

Запишемо ряд Фур'є для напруги, зобразивши вираз (28.2) у вигляді однієї синусоїди:

$$u(t) = U_0 + U_{m1} \sin(\omega t + \beta_1) + U_{m2} \sin(2\omega t + \beta_2) + U_{m3} \sin(3\omega t + \beta_3) + \dots$$

або

$$U(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \sin(k\omega t + \beta_k). \quad (28.6)$$

Члени ряду (28.6), звичайно, називають *гармонічними складовими* або *гармоніками*. Перша складова U_0 – нульова гармоніка або *постійна складова*. Складова $U_{m1} \sin(\omega t + \beta_1)$ – *основна* або *перша* гармоніка. Всі інші складові – *вищі* гармоніки. Кожна гармоніка може мати амплітуду (U_{mk}) і початкову фазу (β_k), які відрізняються від інших, але головною відмінністю гармонік є *частота*, тобто кожна гармоніка має свою частоту.

При розрахунках з використанням рядів, звичайно, обмежуються скінченним числом гармонік.

Діюче значення несинусоїдних струмів і напруг

$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{m1}^2}{2} + \frac{I_{m2}^2}{2} + \frac{I_{m3}^2}{2} + \dots} \quad (28.7)$$

або

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (28.8)$$

Аналогічно

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots} \quad (28.9)$$

Якщо прикладена напруга описується періодичною несинусоїдною функцією, то ця функція може бути зображена рядом Фур'є

$$u = U_0 + U_{m1} \sin(\omega t + \beta_1) + U_{m2} \sin(2\omega t + \beta_2) + \dots \quad (28.10)$$

Вхідну напругу можна розглядати такою, що складається із окремих джерел гармонічної напруги різних частот.

Використовуючи теорему накладання, можна стверджувати, що струми в вітках можна визначати як алгебраїчну суму струмів від дії кожного джерела окремо. Таким чином, розрахунок електричного кола ведеться для кожної гармоніки окремо. Оскільки в цьому випадку напруга джерел синусоїдальна, то струми в вітках будуть синусоїдальними.

соїдна, то може використовуватися метод комплексних амплітуд, а через те що частоти гармонік різні, то й опори віток кола для кожної гармоніки також можуть відрізнятись.

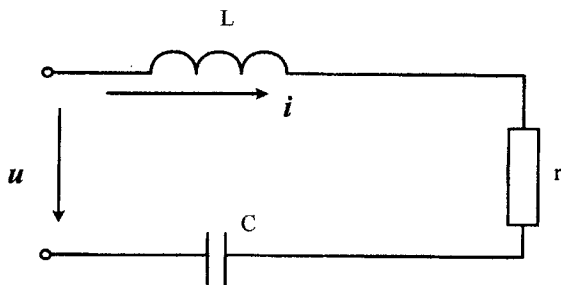


Рисунок 28.2

Розглянемо методику розрахунку на прикладі електричного кола (рис. 28.2). Нехай до цього кола прикладена напруга (28.10).

Постійна складова струму в колі відсутня, через те що ємність для постійного струму являє собою нескінченно великий опір.

Струм першої гармоніки

$$I_{m1} = \frac{U_{m1}}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}, \quad U_{m1} = U_{m1} e^{j\beta_1}.$$

Для k -ї гармоніки змінюються опори індуктивності і ємності:

$$x_{Lk} = k\omega L, \quad x_{Ck} = \frac{1}{k\omega C},$$

тому комплексна амплітуда струму k -ї гармоніки

$$I_{mk} = \frac{U_{mk}}{r + j\left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C}\right)}, \quad U_{mk} = U_{mk} e^{j\beta_k}.$$

Миттєві значення струму знаходяться як сума миттєвих значень струмів різних гармонік. Якщо $I_{mk} = I_{mk} e^{j\alpha_k}$, то

$$i = I_{m1} \sin(\omega t + \alpha_1) + I_{m2} \sin(2\omega t + \alpha_2) + I_{m3} \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots$$

Якщо коло складне, то для кожної гармоніки можна використовувати всі відомі методи розрахунку в комплексній формі.

Активна потужність в колах з несинусоїдними струмами і напругами дорівнює сумі активних потужностей окремих гармонік..

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 + \dots \quad (28.11)$$

За аналогією з колом при синусоїдних струмах вводять поняття повної потужності:

$$S = UI + \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_3^2 + \dots} \cdot \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots} \quad (28.12)$$

Для оцінювання міри відмінності негармонічної кривої від синусоїдної вводять ряд різних коефіцієнтів.

Коефіцієнт *амплітуди* визначається як відношення максимального значення функції до її діючого значення, тобто

$$K_a = \frac{I_m}{I} = \frac{I_m}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}} \quad (28.13)$$

Коефіцієнтом *спотворення* називається відношення діючого значення першої гармоніки до діючого значення всієї функції:

$$K_c = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}} \quad (28.14)$$

Під коефіцієнтом *нелінійних спотворень* розуміють відношення діючого значення вищих гармонік до діючого значення першої гармоніки:

$$K_{н.с} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (28.15)$$

Вирази (28.13) – (28.15) записані для струму. Такі самі коефіцієнти можуть характеризувати і напругу. Звичайно, ці коефіцієнти вводять для кривих, які не мають постійних складових. Тому в них немає складової I_0 .

Порядок виконання роботи

1. За вказівкою викладача зібрати на наборному полі одну з двох схем (рис. 28.3, 28.4). Значення параметрів прийняти згідно з таблицею варіантів (табл. 28.1). Номер варіанта задає викладач.

Таблиця 28.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
L, мГн	50	55	60	65	70	75	75	80
C, мкФ	100	100	100	120	120	140	150	160
R ₂ , Ом	10	15	20	20	25	25	30	30

2. На вхід схеми подати періодичну несинусоїдну напругу за допомогою функціонального генератора. Форму напруги прийняти прямокутну або трикутну (викладач задає одну з цих форм).

3. За допомогою амперметра та вольтметра виміряти струм та напругу на вході кола.

4. За допомогою двопроменевого осцилографа зняти криві вхідної напруги та вхідного струму.

5. Роздрукувати електричну схему, параметри та осцилограми вхідного та вихідного сигналів.

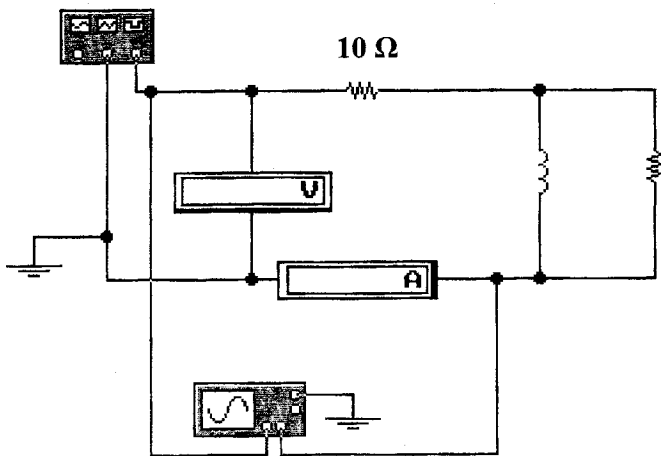


Рисунок 28.3

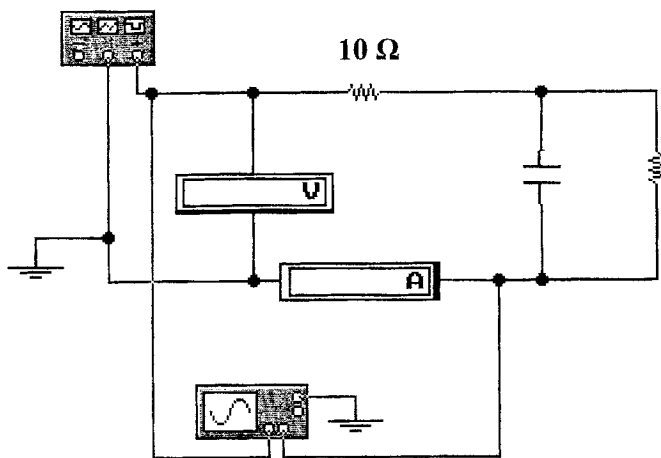


Рисунок 28.4

Оброблення результатів дослідів

1. Аналітично розкласти задану криву ЕРС на вході кола в ряд Фур'є обмежившись першими трьома гармоніками.

2. Побудувати графік прикладеної ЕРС як суму перших трьох гармонік та порівняти його із заданим.
3. Аналітично розрахувати діючі значення вхідних струму і напруги та порівняти їх із отриманими дослідним шляхом.
4. Розрахувати миттєве значення вхідного струму і побудувати його графік
5. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються один від одного гармонічні складові?
2. Як залежить діюче значення струму від початкових фаз гармонік?
3. Які види симетрії графіків функцій корисно знати при розкладанні цих функцій в ряд Фур'є?
4. В яких випадках вхідний опір кола залишається однаковим для всіх гармонік?

Лабораторна робота № 30wb

Дослідження найпростіших випрямлячів змінного струму

Мета роботи: експериментальне дослідження ефективності та форм напруг одно- та двопівперіодних випрямлячів.

Теоретичні положення

Електрофізичні властивості напівпровідників

До напівпровідників відноситься велика кількість речовин і елементів, що за електричними властивостями займають проміжне положення між провідниками і діелектриками. Найбільш широке застосування в напівпровідниковій техніці одержали германій, кремній, селен, а також напівпровідникові з'єднання типу арсенід галію, карбід кремнію, сульфід кадмію та ін.

Для напівпровідників характерна кристалічна будова, тобто закономірне й упорядковане розташування їхніх атомів у просторі. У кристалах пов'язані між собою атоми розташовуються певним чином і на однакових відстанях один від одного, у результаті чого утворюються своєрідні ґрати з атомів, що прийнято називати *кристалічними ґратами твердого тіла*.

Між атомами кристалічних ґрат існують зв'язки. Вони утворюються валентними електронами, що взаємодіють не тільки з ядром свого атома, але і із сусідніми. У кристалах германію зв'язок між двома сусідніми атомами здійснюється двома валентними електронами – по одному від кожного атома.

Характерна риса двоелектронних зв'язків полягає в тому, що при їхньому утворенні електрони зв'язку належать уже не одному, а відразу обом, пов'язаним між собою атомам, тобто є для них спільними. У результаті зовнішня орбіта кожного з атомів має наче по вісім електронів і стає цілком заповненою. У такому кристалі усі валентні електрони міцно пов'язані між собою і вільних електронів, що могли б брати участь у переносі зарядів, немає. Такі кристалічні ґрати мають усі хімічно чисті напівпровідники при температурі абсолютного нуля (-273°C). У цих умовах напівпровідники мають властивості ідеальних ізоляторів.

Під дією зовнішніх чинників деякі валентні електрони атомів кристалічних ґрат набувають енергії, достатньої для звільнення від ковалентних зв'язків. Так, при будь-яких температурах вище абсолютного нуля атоми твердого тіла коливаються біля вузлів кристалічних ґрат. Чим вища температура, тим більша амплітуда коливань. Час від часу енергія цих коливань, окремі флуктуації якої можуть перевищувати її середнє значення, передаються будь-якому електрону, у результаті чого його повна енергія є достатньою для переходу з валентної зони в зону провідності.

Як відомо, для напівпровідників ширина забороненої зони, що розділяє зону енергії валентних електронів від зони провідності, незначна. Тому для одержання помітної провідності в цих речовинах, звичайно, достатньо теплової енергії, що виникає в електронів при кімнатній температурі.

При звільненні електрона від ковалентного зв'язку в останньому виникає наче вільне місце, що має елементарний позитивний заряд, рівний за абсолютною величиною заряду електрона. Таке місце, що звільнилося в електронному зв'язку, умовно назвали *діркою*, а процес утворення пари *електрон – дірка* одержав назву *генерації зарядів*. Дірка має позитивний заряд, тому вона може приєднати до себе електрон сусіднього заповненого ковалентного зв'язку. У результаті цього відновлюється один зв'язок (цей процес називають *рекомбінацією*) і руйнується сусідній в іншому місці. Такий генераційно-рекомбінаційний процес безупинно повторюється, і дірка, переходячи від одного зв'язку до іншого, буде переміщатися по кристалу, що адекватно переміщенню позитивного заряду, рівного за величиною заряду електрона. При цьому треба мати на увазі, що концентрація дірок в ідеальному кристалі хімічно чистого напівпровідника завжди дорівнює концентрації вільних електронів.

При відсутності зовнішнього електричного поля електрони і дірки переміщаються в кристалі хаотично. У цьому випадку струм у напівпровіднику не виникає. Якщо ж на кристал діє електричне поле, переміщення дірок й електронів стає упорядкованим і в кристалі виникає електричний струм.

У хімічно чистому кристалі напівпровідника число дірок завжди дорівнює числу вільних електронів і електричний струм у ньому утвориться в результаті одночасного переносу зарядів обох знаків. Така електронно-діркова провідність називається *власною провідністю напівпровідника*. При цьому

загальний струм у напівпровіднику дорівнює сумі електронного і діркового струмів.

Питома електропровідність напівпровідника залежить від тилу речовини та від температури. *Чим вища температура, тим питома електропровідність вища*, причому ця залежність носить експоненційний характер.

Істотно змінює провідність напівпровідника наявність домішок.

Залежно від того, атоми якої речовини будуть введені в кристал, можна одержати перевищення надлишкових електронів або дірок, тобто одержати напівпровідник з електронною або дірковою провідністю.

Провідність, викликана присутністю в кристалі напівпровідника домішок з атомів з іншою валентністю, називається домішковою. Домішки, що викликають у напівпровіднику збільшення вільних електронів, називаються *донорними*, а ті що викликають збільшення дірок – *акцепторними*.

Різна дія домішок пояснюється так. Припустимо, що в кристал германію, атоми якого мають чотири валентних електрони, введений атом речовини, що має на зовнішній орбіті не чотири, а п'ять валентних електронів, наприклад, атом миш'яку. У цьому випадку атоми миш'яку своїми чотирма з п'ятьох валентними електронами вступають у зв'язок з атомами кристалічних грат германію. П'ятий валентний електрон миш'яку виявиться надлишковим (вільним) електроном. Напівпровідники, електропровідність яких підвищилася завдяки утворенню надлишку вільних електронів при введенні домішок, називаються *напівпровідниками з електронною провідністю* або скорочено *напівпровідниками типу n*. Введення в чотиривалентний напівпровідник тривалентного елемента, наприклад, індію, призводить, навпаки, до надлишку дірок над вільними електронами. У цьому випадку ковалентні зв'язки не будуть цілком завершені і дірки, що утворилися, можуть переміщатися по кристалу, створюючи діркову провідність. Напівпровідники, електропровідність яких обумовлюється в основному переміщенням дірок, називаються *напівпровідниками з дірковою провідністю* або скорочено *напівпровідниками типу p*.

Струм у напівпровіднику з'являється як наслідок спрямованого переміщення носіїв заряду. Розрізняють два можливих випадки появи струму в напівпровіднику. Струм, обумовлений зовнішнім електричним полем, одержав назву *дрейфового струму*. Струм, що виникає в результаті дифузії носіїв з області, де їхня концентрація підвищена, у напрямку області з більш низькою концентрацією, називається *дифузійним струмом*. Нерівномірність концентрації носіїв зарядів у напівпровіднику може виникнути під дією світла, нагрівання, електричного поля тощо.

Однорідні напівпровідники знаходять обмежене застосування: вони безпосередньо використовуються лише як напівпровідникові резистори. Більшість дискретних напівпровідникових приладів і елементів мікросхем являють собою неоднорідні структури. Основні різновиди таких структур –

контакт двох напівпровідників із різним типом провідності n - і p - типу і контакт металу з напівпровідником.

Найбільше поширення в напівпровідниковій техніці та мікроелектроніці одержали контакти типу напівпровідник – напівпровідник.

Електричний перехід між двома областями напівпровідника з різними видами провідності називають електронно-дірковим або p - n переходом (рис. 30.1).

Розглянемо явища, що виникають при електричному контакті між напівпровідниками n - і p - типів з однаковою концентрацією донорних і акцепторних домішок.

Внаслідок того, що концентрація електронів у n -області вища, ніж у p -області, а концентрація дірок у p -області вища, ніж у n -області, на межі цих областей існує градієнт концентрацій носіїв, що викликає дифузійний струм електронів із n -області в p -область і дифузійний струм дірок із p -області в n -область.

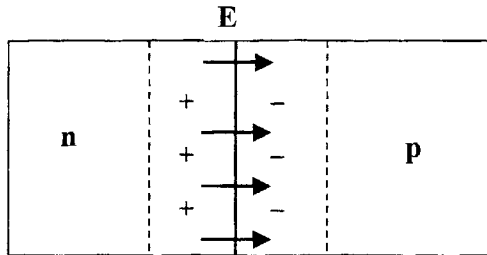


Рисунок 30.1

Якби електрони і дірки були нейтральними, то дифузія в остаточному підсумку призвела би до повного вирівнювання їхньої концентрації по всьому об'єму кристала. В дійсності дифузійні струми через p - n перехід не призводять до вирівнювання концентрації носіїв в обох частинах напівпровідника. Дифузія електронів з приконтактної n -області призводить до того, що їхня концентрація тут зменшується і виникає некомпенсований позитивний заряд іонів донорної домішки. Так само в p -області внаслідок дифузії дірок їхня концентрація у приконтактному прошарку знижується і тут виникає некомпенсований негативний заряд іонів акцепторної домішки. Таким чином, на межі областей n - і p -типу утворяться два прошарки протилежних за знаком зарядів. Область просторових зарядів, що утворилися, і є p - n перехід. Його ширина не перевищує десятих часток мікрметра.

Просторові заряди в переході утворюють електричне поле, спрямоване від позитивно заряджених іонів донорів до негативно заряджених іонів акцепторів. Схема утворення електричного поля в p - n переході показана на рис. 30.1. Це поле є гальмуючим для основних носіїв заряду й прискорювальним для неосновних.

При порушенні рівноваги $p-n$ переходу зовнішнім електричним полем через нього починає протікати струм. Характер проходження і величина струму залежать від полярності прикладеної напруги.

Спочатку розглянемо випадок, коли зовнішня напруга протилежна за знаком контактній різниці потенціалів (рис. 30.2). У цьому випадку джерело вмикається так, що поле, утворюване зовнішньою напругою, спрямоване назустріч власному полю $p-n$ переходу. Таке вмикання називають *прямим*. Воно призводить до зниження висоти потенційного бар'єра. Основні носії заряду одержують можливість наблизитися до контакту і ширина $p-n$ переходу зменшиться.

Частина основних носіїв, що мають найбільші значення енергії, зможе подолати потенційний бар'єр і перейти через межу, що розділяє напівпровідники n і p типу. При цьому дифузійна складова струму стає більша дрейфової і результуючий прямий струм через перехід стає відмінним від нуля.

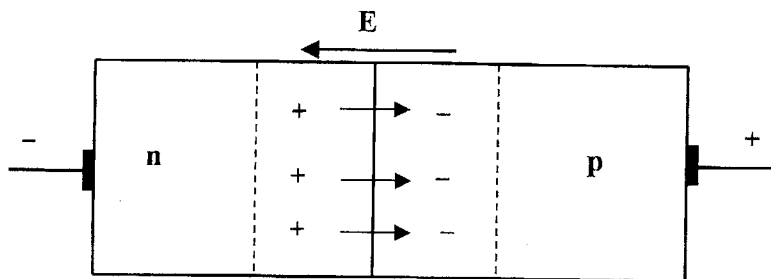


Рисунок 30.2

При збільшенні зовнішньої прямої напруги прямий струм через перехід може зрости до дуже великих значень, тому що він обумовлений, головним чином, потоком основних носіїв, концентрація яких в обох областях велика.

Процес уведення носіїв заряду через електронно-дірковий перехід при зниженні висоти потенційного бар'єру в область напівпровідника, де ці носії заряду є неосновними, називається *інжекцією*.

Розглянемо тепер властивості $p-n$ переходу, до якого підведена зворотна зовнішня напруга. При цьому електричне поле, утворюване джерелом, збігається з полем $p-n$ переходу. Потенційний бар'єр між p і n областями зростає. Кількість основних носіїв, що спроможні подолати дію результуючого поля, зменшується. Відповідно зменшується і струм дифузії основних носіїв заряду. Під дією електричного поля, утворюваного зовнішнім джерелом, основні носії будуть відтягатися від приконтактних прошарків углиб напівпровідника. У результаті ширина $p-n$ переходу збільшується.

Для неосновних носіїв (дірок у n -області й електронів у p -області) потенційний бар'єр в переході відсутній і вони будуть втягуватися полем в області $p-n$ переходу. Це явище називається *екстракцією*.

При зворотньому вмиканні переважну роль відіграє дрейфовий струм, що має незначну величину, тому що він створюється рухом неосновних носіїв. Цей струм одержав назву *зворотного струму*.

Величина зворотного струму практично не залежить від зовнішньої зворотної напруги. Це можна пояснити тим, що за одиницю часу кількість генерованих пар електрон-дірка при незмінній температурі залишається незмінним.

Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковим діодом називається пристрій із двома затискачами, що містить один **p-n** перехід.

Найбільше застосування одержали германієві та кремнієві напівпровідникові діоди, а також діоди, виконані на основі арсеніду галію.

У залежності від способу одержання **p-n** переходів напівпровідникові діоди поділяються на два типи: *площинні і точкові*.

Широке поширення в сучасній напівпровідниковій техніці одержали: *випрямні, імпульсні, високочастотні, тунельні діоди; стабілітрони; варикапи; фотодіоди; світлодіоди*.

Випрямні діоди використовуються у випрямлячах змінної напруги. Основними методами одержання **p-n** переходів для випрямних діодів є *сплавлення і дифузія*.

Явище електричного пробою, небезпечне для звичайних діодів знаходить корисне застосування в кремнієвих площинних діодах – *кремнієвих стабілітронах*. Нормальним режимом роботи стабілітронів є робота при зворотній напрузі, що відповідає зворотному електричному пробою **p-n** переходу. У прямому напрямку вольтамперна характеристика стабілітрона практично не відрізняється від прямої вітки будь-якого кремнієвого діода. Зворотна вітка її має вигляд прямої вертикальної лінії, що проходить майже паралельно осі струмів. Тому при зміні в широких межах струму спад напруги на пристрої практично не змінюється. Ця властивість кремнієвих діодів і дозволяє використовувати їх як стабілізатори напруги. Оскільки електричний пробій має місце при порівняно низькій зворотній напрузі, потужність, що виділяється в **p-n** переході навіть при значних зворотних струмах, буде не значною, що захищає **p-n** перехід від теплового (незворотного) пробою.

Високочастотні діоди – пристрої універсального призначення. Вони можуть бути використані для випрямлення, детектування та інших нелінійних перетворень електричних сигналів у діапазоні частот до 600 МГц. Високочастотні діоди виготовляються, як правило, із германію або кремнію і мають точкову структуру.

Імпульсні діоди призначені для роботи у швидкодіючих імпульсних схемах із часом перемикавання 1 мкс і менше. При настільки коротких робочих

імпульсах слід враховувати інерційність процесів вмикання і вимикання діодів і приймати відповідні конструктивно-технологічні заходи.

Варикапами називають напівпровідникові діоди, в яких використовуються бар'єрна емність замкненого *p-n* переходу, яка залежить від величини прикладеної до діоду зворотної напруги. При зростанні напруги, ширина *p-n* переходу збільшуються, а його бар'єрна смість зменшується. Основне застосування варикапів – електронне настроювання коливальних контурів.

Тунельним називається напівпровідниковий діод, в характеристиці якого є область від'ємного диференціального опору. Завдяки цьому тунельний діод можна розглядати як пристрій із двома стійкими станами, тобто електронний ключ. Перехід з одного стійкого стану в інший відбувається дуже швидко, у зв'язку з чим тунельні діоди принципово придатні для роботи в ЕОМ (у схемах тригерів, логічних елементів тощо).

Фотодіод являє собою фотогальванічний приймач випромінювання без внутрішнього посилення, fotocутливий елемент якого містить структуру напівпровідникового діода. Напруга джерела живлення, зазвичай, прикладається до фотодіода в зворотному напрямку. Коли фотодіод не освітлений, в колі проходить незначний зворотний струм. При освітленні фотодіода з'являється додаткове число електронів і дірок, внаслідок чого збільшується перехід неосновних носіїв заряду. Це призводить до збільшення струму в колі. Слід зазначити, що фотодіод можна вмикати в схеми як із зовнішнім джерелом живлення, так і без нього. Режим роботи фотодіода із зовнішнім джерелом живлення називають *фотодіодним*, а без зовнішнього джерела – *вентильним*. У вентильному режимі у фотодіоді під дією світлового потоку виникає ЕРС, тому він не потребує стороннього джерела напруги.

Світлодіодом називають випромінюючий напівпровідниковий пристрій з одним *p-n* переходом, призначений для безпосереднього перетворення електричної енергії в енергію некогерентного світлового випромінювання. При поданні на *p-n* перехід прямої напруги спостерігається інтенсивна інжекція неосновних носіїв заряду: електронів у *p*-область і дірок у *n*-область. Інжектвані неосновні носії рекомбінують з основними носіями даної області напівпровідника і при цьому виділяється енергія. У багатьох напівпровідниках рекомбінація носить безвипромінювальний характер – енергія, що виділяється при рекомбінації, віддається кристалічним ґратам, тобто перетворюється в тепло. Проте в напівпровідниках, виконаних на основі карбіду кремнію, галію, миш'яку та деяких інших матеріалів, рекомбінація є випромінювальною – енергія рекомбінації виділяється у вигляді *фотонів*. Тому в таких напівпровідниках проходження через *p-n* перехід струму в прямому напрямку супроводжується некогерентним оптичним випромінюванням певного спектрального складу.

Це явище використовується для створення *світлодіодів*, яких іноді називають також *люмінесцентними діодами*. У залежності від ширини забор-

роненої зони напівпровідника й особливостей рекомбінації носіїв заряду випромінювання може знаходитись в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах спектра. Найбільше поширення одержали світлодіоди, що випромінюють жовте, червоне і зелене світло.

Випрямлячі

Випрямлячем називається пристрій, який перетворює змінний струм в постійний. Найпростіший складається із послідовного з'єднання діода і опору навантаження (рис. 30.3, а).

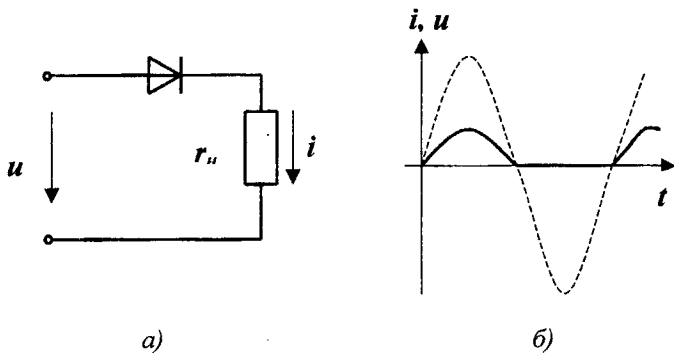


Рисунок 30.3

Приймемо характеристику діода ідеальною. Якщо напруга синусоїдна $u = U_m \sin \omega t$, то і струм, що протікає через навантаження в додатний півперіод, теж синусоїдний, тобто $i = I_m \sin \omega t$, $I_m = U_m / r_n$.

У від'ємний півперіод діод закритий, його опір нескінченний, струму в колі немає (рис.30.3, б).

Таким чином

$$i = \begin{cases} I_m \sin \omega t & kT < t < \frac{2k+1}{2} T, \\ 0, & \frac{2k+1}{2} T < t < (k+1)T. \end{cases} \quad (30.1)$$

Визначимо величину постійної складової струму, який протікає через навантаження

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{\pi}. \quad (30.2)$$

Діюче значення струму навантаження

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{2}. \quad (30.3)$$

Ефективність випрямлення, звичайно, характеризується коефіцієнтом ефективності випрямлення, який дорівнює відношенню потужності постійної складової струму навантаження

$$P_0 = I_0^2 r_H$$

до всієї потужності, яка витрачається джерелом $P = I^2 r_H$,

$$K_e = \frac{P_0}{P}.$$

В випрямлячі з ідеальним діодом

$$K_e = \frac{P_0}{P} = \frac{\frac{I_m^2}{\pi^2} r_H}{\frac{I_m^2}{4} r_H} = \frac{4}{\pi^2} = 0,406.$$

Кращий коефіцієнт ефективності має мостовий випрямляч, який показаний на рис. 30.4, а.

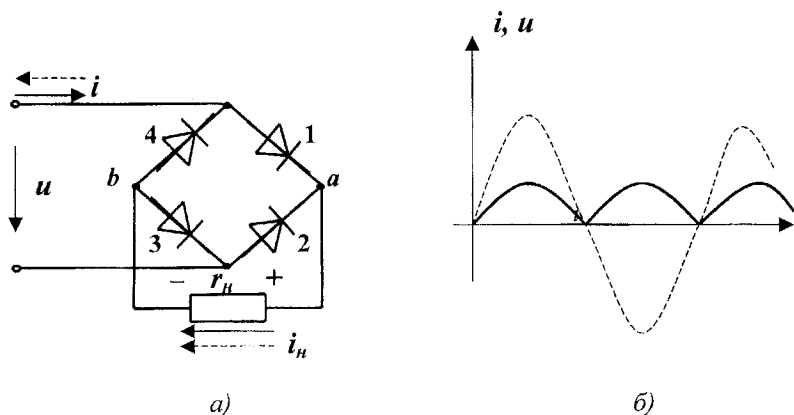


Рисунок 30.4

В додатний півперіод прикладеної напруги струм проходить через діод 1, навантаження, діод 3, а у від'ємний півперіод – через діод 2, навантаження, діод 4. Струм в навантаженні в обидва півперіоди направлений в одну і ту ж сторону, від точки *a* до точки *b* (рис.30.4, б) і тому

$$i = \begin{cases} I_m \sin \omega t & kT < t < \frac{2k+1}{2}T, \\ -I_m \sin \omega t & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T. \end{cases} \quad (30.4)$$

Постійна складова струму навантаження

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{2I_m}{\pi}. \quad (30.5)$$

Діюче значення струму навантаження

$$I_n = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (30.6)$$

Ефективність випрямлення

$$K_e = \frac{P_o}{P} = \frac{\frac{4I_m^2}{\pi^2} r_n}{\frac{I_m^2}{2} r_n} = \frac{8}{\pi^2} = 0,812.$$

Підготовка до роботи

1. Описати принципи роботи одно- та двопівперіодних випрямлячів та нарисувати якісні хвильові діаграми напруг на вході випрямляча, одного із діодів та опорі навантаження.

2. Записати розрахункові формули постійної складової та діючого значення струму в навантаженні, а також коефіцієнта ефективності випрямлення одно- та двопівперіодних випрямлячів.

3. Пояснити роль ємнісного фільтра у збільшенні ефективності випрямлення.

4. Якої системи вимірювальні прилади використовуються для вимірювання діючих значень та постійних складових змінних струмів і напруг у випрямних схемах?

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис. 30.5).

2. Змінюючи напругу на вході кола з 0.5 В до 1.5 В, зняти пряму вітку ВАХ діода. Потім, помінявши місцями затискачі діода, зняти зворотну вітку ВАХ діода (напругу на вході кола в цьому випадку визначити самостійно). Результати вимірювань занести в таблицю 30.1.

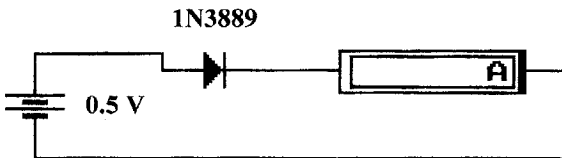


Рисунок 30.5

Таблиця 30.1

Упр.							
Іпр.							
Uзвор.							
Iзвор.							

3. Скласти схему однопівперіодного випрямлення (рис. 30.6).

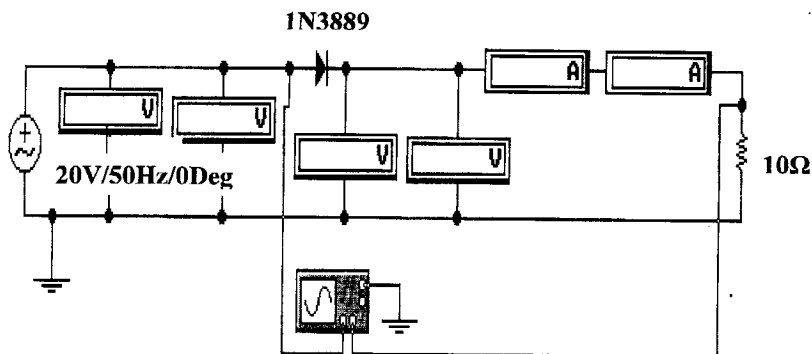


Рисунок 30.6

В цій схемі кожен з параметрів – вхідна напруга, вихідна напруга, вихідний струм вимірюються двома приладами, один з яких має опцію AC, другий – опцію DC.

4. Зняти та записати в таблицю 30.2 показання приладів.

Відмітимо, що у випадку, якщо вольтметр вимірює несинусоїдну напругу, опція AC забезпечить вимірювання діючого значення змінної складової несинусоїдної напруги, а опція DC – постійної складової несинусоїдної напруги. Результуюче діюче значення несинусоїдної напруги визначається за формулою: $U_d = \sqrt{U_{AC}^2 + U_{DC}^2}$.

У випадку, якщо амперметр вимірює несинусоїдний струм, опція AC забезпечить вимірювання діючого значення змінної складової несинусоїдного струму, а опція DC – постійної складової несинусоїдного струму. Результуюче діюче значення несинусоїдного струму визначається за формулою: $I_d = \sqrt{I_{AC}^2 + I_{DC}^2}$.

Таблиця 30.2

$U_{вх}$	$U_{вхо}$	U_n	$U_{но}$	I_n	$I_{но}$

$U_{вх}$ $U_{вхо}$ – діюче значення напруги на вході кола та її постійна складова;
 U_n $U_{но}$ – відповідні напруги на опори навантаження;

I_n, I_{no} – відповідні струми через опір навантаження.

5. Роздрукувати осцилограми напруг на вході та на навантаженні.

6. Увімкнувши паралельно навантаженню ємність C_ϕ (див. рис. 30.7), в'яснити, як зміниться постійна складова струму через навантаження. Підібрати величину ємності C_ϕ такою, щоб постійна складова струму в опорі навантаження I_{no} змінилась приблизно в два рази у порівнянні із його значенням в п.4. Записати це значення ємності C_ϕ .

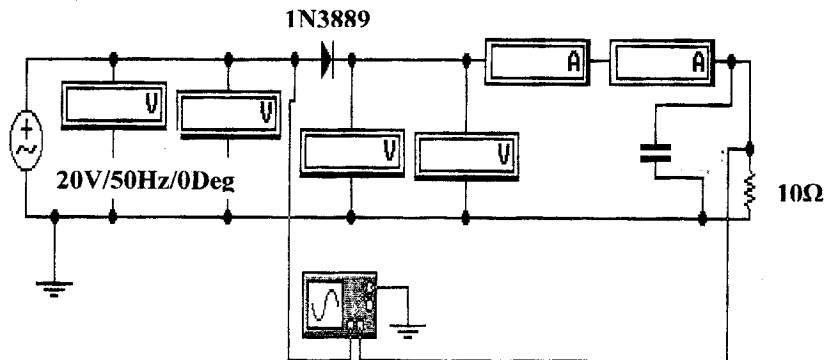


Рисунок 30.7

7. Скласти схему двопівперіодного випрямлення (рис.30.8, 30.9).

8. Зняти та записати в таблицю 30.3 показання приладів.

Таблиця 30.3

U_{ex}	U_{exo}	U_n	U_{no}	I_{ex}	I_{exo}	I_n	I_{no}

U_{ex}, U_{exo} – діюче значення напруги на вході кола та її постійна складова;

U_n, U_{no} – відповідні напруги на опорі навантаження;

I_{ex}, I_{exo} – діюче значення струму на вході кола та його постійна складова;

I_n, I_{no} – відповідні струми через опір навантаження.

Оброблення результатів дослідів

1. За даними досліду п.2 побудувати ВАХ діода, вказавши на ній робочі ділянки характеристики.

2. Провівши апроксимацію робочих ділянок прямої та зворотної віток ВАХ діода прямими лініями, визначити величини прямого та зворотного опорів діода.

3. Побудувати суміщені в часі діаграми напруг на вході кола та опорі навантаження. Зробити порівняльний аналіз діаграм та вказати на причини відмінностей між ними. Пояснити, чому форма струму на опорі навантаження відрізняється від форми вхідної напруги.

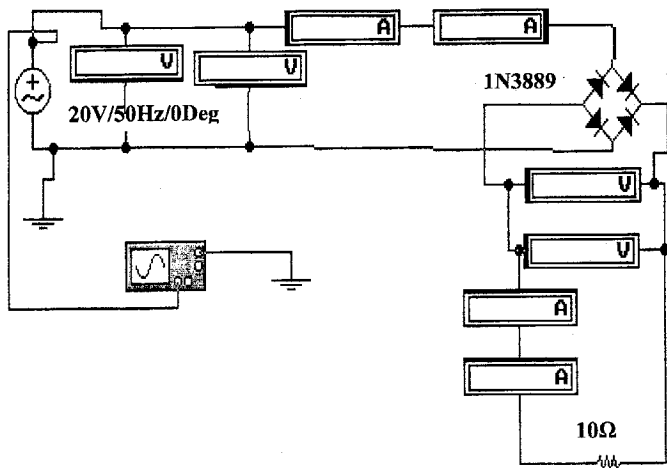


Рисунок 30.8

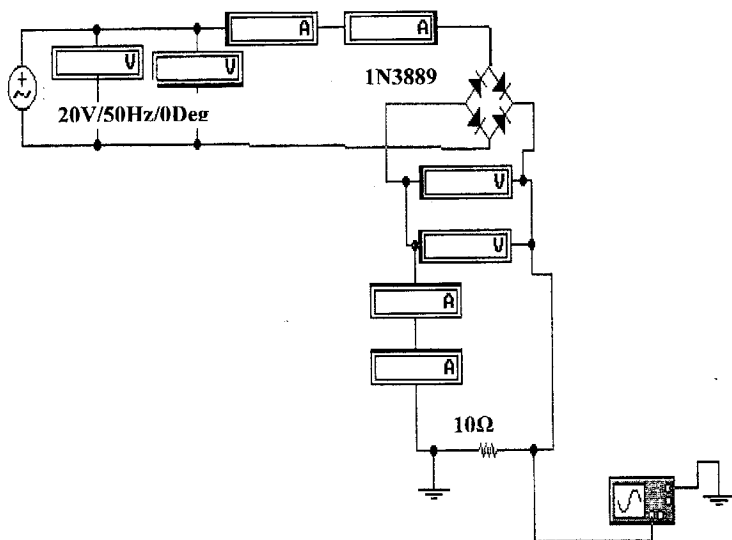


Рисунок 30.9

4. За даними вимірювань визначити коефіцієнти ефективності випрямлення K_e .

Контрольні запитання

1. Фізичні принципи роботи напівпровідникового діода.
2. Принципи роботи одно- та двопівперіодних випрямлячів.
3. Розкладання вихідної напруги випрямляча в ряд Фур'є.
4. Способи зменшення амплітуд вищих гармонік на виході випрямляча.

Література

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч.1–М.: Энергия, 1978.– 592с.
2. Зевеке Г.В. и др. Основы теорий цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528с.
3. Карпов Ю.О., Магас Т.Є., Мадьяров В.Г. Конспект лекцій з курсу “Теоретичні основи електротехніки”. Ч.1 – Вінниця: ВП, 1992. – 174с.
4. Нейман А.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1. –Л.: Энергоиздат, 1981. – 534с.
- 5.Перхач В.С. Теоретична електротехніка. – К.: Вища школа, 1992. – 440с.

Навчальне видання

Самоїл Шулімович Кацив
В'ячеслав Губейович Мадьяров
Ігор Костянтинович Говор

Комп'ютерне моделювання електричних кіл

Лабораторний практикум

Оригінал-макет підготовлено авторами

Редактор О. Д. Скалоцька

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку 14.02.2008 р. Гарнітура Times New Roman
Формат 29,7 x 42 $\frac{1}{4}$ Папір офсетний

Друк різнографічний Ум. друк. арк. 5.6
Тираж 100 прим.
Зам. № 2008-018

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95