

CONTENTS

Part 1. Laboratory works	3
INTRODUCTION.....	3
Laboratory work 1. INTRODUCTION TO ELECTRONICS WORKBENCH ..	5
Laboratory work 2. DIRECT CURRENT CIRCUITS.....	20
Laboratory work 3. ALTERNATING CURRENT CIRCUITS.....	29
Laboratory work 4. FREQUENCY CHARACTERISTICS OF LINEAR CIRCUITS.....	38
Laboratory work 5. SINGLE AND COUPLED OSCILLATORY CIRCUITS.....	50
Laboratory work 6. TRANSIENT PROCESSES IN FIRST-ORDER CIRCUITS.	63
Laboratory work 7.....	75
TRANSIENT PROCESSES IN SECOND-ORDER CIRCUITS.....	75
Part 2. PRACTICAL CLASSES.....	90
INTRODUCTION.....	90
Practical class 1. BASIC LAWS OF CURRENT FLOW	91

ЗМІСТ

Частина 1. Лабораторні роботи	3
ВСТУП.....	3
Лабораторна робота 1. ВСТУП ДО ELECTRONICS WORKBENCH	5
Лабораторна робота 2. ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	20
Лабораторна робота 3. ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ	29
Лабораторна робота 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНИХ КІЛ	38
Лабораторна робота 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ОДИНОЧНИХ І ЗВ'ЯЗАНИХ КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ	50
Лабораторна робота 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ	63
Лабораторна робота 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ ДРУГОГО ПОРЯДКУ	75
Частина 2. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ	90
ВСТУП.....	90
Практичне заняття 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ЗАКОНІВ СТРУМОПРОХОДЖЕННЯ.....	91

Practical class 2. CALCULATION OF CIRCUITS BY THE METHOD OF EQUIVALENT TRANSFORMATIONS AND BY THE METHOD OF KIRCHOFF'S EQUATIONS	104	Практичне заняття 2. РОЗРАХУНОК КІЛ МЕТОДОМ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТА МЕТОДОМ РІВНЯНЬ КІРХГОФА	104
Practical class 3. CALCULATION OF CIRCUITS BY THE METHOD OF LOOP CURRENTS AND THE NODE-VOLTAGE METHOD	116	Практичне заняття 3. РОЗРАХУНОК КІЛ МЕТОДОМ КОНТУРНИХ СТРУМІВ ТА МЕТОДОМ ВУЗЛОВИХ НАПРУГ	116
Practical class 4. CALCULATION OF SIMPLE HARMONIC CURRENT CIRCUITS	130	Практичне заняття 4. РОЗРАХУНОК ПРОСТИХ КІЛ ГАРМОНІЧНОГО СТРУМУ ...	130
Practical class 5. CALCULATION OF COMPLEX HARMONIC CURRENT CIRCUITS	139	Практичне заняття 5. РОЗРАХУНОК СКЛАДНИХ КІЛ ГАРМОНІЧНОГО СТРУМУ ...	139
Practical class 6. SINGLE AND COUPLED OSCILLATORY CIRCUITS	149	Практичне заняття 6. ОДИНОЧНІ ТА ЗВ'ЯЗАНІ КОЛИВАЛЬНІ КОНТУРИ	149
Practical class 7. ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN FIRST-ORDER CIRCUITS BY THE CLASSICAL METHOD	161	Практичне заняття 7. АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ КЛАСИЧНИМ МЕТОДОМ	161
Practical class 8. ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES BY THE OPERATOR METHOD	171	Практичне заняття 8. АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ОПЕРАТОРНИХ СХЕМ	171
BASIC LITERATURE	182	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	182
LIST OF BASIC TERMS	183	СПИСОК ТЕРМІНІВ	183

Part I

Laboratory works

INTRODUCTION

Equipment and software.

Lab assignments are carried out by using Electronics Workbench software in a computerized classroom. This software has been developed in Canada where the system of standards is quite different from the Ukrainian one. Therefore, all figures below should not be considered as standardized circuit drawings, but illustrations intended to help students simulate circuits in the Electronics Workbench environment. Electronics Workbench is used for computer-based simulation of different electronic circuits. It contains comprehensive libraries of close-to-real models of electronic components. These components are used to design adequate models of real electronic circuits. Electronics Workbench also provides virtual testing equipment that facilitates observation of processes occurring in simulated electronic circuits.

General instructions

Program Electronics Workbench has become wide spread,

Частина 1

Лабораторні роботи

ВСТУП

Обладнання та програмне

забезпечення. Лабораторні роботи проводяться за допомогою програми Electronics Workbench у комп'ютерному класі. Цю програму розроблено в Канаді, де використовують іншу систему стандартизації, ніж в Україні. Тому подані нижче рисунки не є схемами, а лише наочними ілюстраціями, що допомагають студенту моделювати в середовищі програми Electronics Workbench. Програму Electronics Workbench призначено для комп'ютерного моделювання функціонування електронних схем різних пристроїв. Вона містить великі бібліотеки моделей електронних компонентів, з яких складаються моделі схем (близькі до реальних схем за властивостями), а також моделі віртуальних контрольно-вимірювальних приладів, що дозволяють контролювати робочі процеси в електричних схемах.

Загальні вказівки

Програма Electronics Workbench набула значного поши-

and therefore this manual provides that the student will be able to work with it independently with the teacher's assistance.

When doing the laboratory works the student sets up, in the software environment, the circuit of a desired measuring bench, measures the characteristics of this circuit by means of virtual testing instruments, makes drawings that show the results of the measurements. Then the student should carry out calculations of the basic characteristics of the electric circuits under investigation on the basis of formulas given in the section "Brief theoretical information".

Having compared the results of simulation carried out in the Electronics Workbench environment with analytical calculations based on formulas given in the course "Fundamentals of circuit theory. Linear circuits", the student will be able to estimate obviously the two ways of electric circuit analysis. This estimation should be reflected in the **Report**. The student is supposed to be able to carry out calculations of linear electric circuits.

рення, і тому цей навчальний посібник передбачає, що студент опанує роботу з нею самостійно за допомогою викладача.

Під час виконання лабораторних робіт студент складає у середовищі програми схему того або іншого вимірювального стенда, вимірює характеристики схеми за допомогою віртуальних контрольно-вимірювальних приладів, будує графіки, що відображають результати вимірювань. Потім студент виконує розрахунки основних характеристик досліджуваних електричних кіл за формулами, наведеними у розділах «Основні теоретичні відомості».

Порівняння результатів моделювання, проведеного у середовищі програми Electronics Workbench, і аналітичних розрахунків, виконаних на підставі формул, вивчених у курсі «Основи теорії кіл. Лінійні кола», дозволить наочно оцінити два способи аналізу електричних кіл. Ця оцінка має бути відображена у **звіті**. Студент має показати вміння виконувати розрахунки лінійних електричних кіл.

Laboratory work 2

INTRODUCTION TO ELECTRONICS WORKBENCH

(Estimated time: 2 hours)

Aim of the work. Studying the basic features of Electronics Workbench; learning how to set up simple direct and alternating current circuits and measure their characteristics using virtual test equipment.

When preparing for the laboratory work a student should study this description as well as appropriate units of the recommended literature, and be able to answer the following test questions

Test questions

1. What components are stored in the catalogues of the **Sources** library?
2. What components are stored in the catalogues of the **Basic** library?
3. What components are stored in the catalogues of the **Diodes** library?
4. What components are stored in the catalogues of the **Transistors** library?
5. What components are stored in the catalogues of the **Indicators** library?
6. What components are stored in the catalogues of the **Instruments** library?
7. How are the properties of the components set?
8. How are the properties of the devices set?

Лабораторна робота 2

ВСТУП ДО ELECTRONICS WORKBENCH

(Рекомендований
обсяг занять: 2 год)

Мета роботи. Вивчити основні можливості програми Electronics Workbench, освоїти побудову найпростіших кіл постійного і змінного струмів та вимірювання їх характеристик за допомогою віртуальних приладів цієї програми.

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно вивчити відповідний матеріал за рекомендованою літературою, а також уміти відповідати на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Які компоненти розміщуються в каталогах бібліотеки **Sources**?
2. Які компоненти розміщуються в каталогах бібліотеки **Basic**?
3. Які компоненти розміщуються в каталогах бібліотеки **Diodes**?
4. Які компоненти розміщуються в каталогах бібліотеки **Transistors**?
5. Які прилади розміщуються в каталогах бібліотеки **Indicators**?
6. Які прилади розміщуються в каталогах бібліотеки **Instruments**?
7. Як змінюються властивості компонентів?
8. Як змінюються властивості приладів?

9. How do the components change their orientation in the circuit?

10. How are the circuit components connected to one another?

Brief theoretical information

The Electronics Workbench program is intended to simulate the operation of electronic circuits of various devices by means of a computer. It contains an extensive library of electronic component models of which circuit models (whose properties are similar to those of actual circuits) are made up. It also contains models of virtual testing equipment that allows keeping processes in the circuits under control.

Versions 5.0 и 5.12 of the Electronics Workbench Program has been developed by Interactive Image Technologies, Versions 8.0 and 10.0 – by National Instruments. The Interactiv Image Technologies company has been incorporated into the National Instruments group, and the latest versions of the program are known as Electronics Workbench Multisim (www.ni.com/russia).

The Electronics Workbench program has great functional capabilities, so its description can be found in a large number of sources. Some of them are referred to in the list of recommended literature, others are available on the Internet. For these sources not

9. Як змінюється орієнтація компонента в схемі?

10. Як з'єднуються компоненти у схемі?

Основні теоретичні відомості

Програму Electronics Workbench призначено для комп'ютерного моделювання роботи електронних схем різних пристроїв. Вона містить бібліотеку моделей електронних компонентів, з яких складаються моделі схем (близькі до реальних схем за властивостями), а також моделі віртуальних контрольно-вимірювальних приладів, що дозволяють контролювати робочі процеси в схемах.

Програму Electronics Workbench версій 5.0 і 5.12 розроблено фірмою Interactive Image Technologies, а програму версій 8.0 і 10.0 – концерном National Instruments. Фірма Interactive Image Technologies увійшла до складу концерну National Instruments, і останні версії програми називаються Electronics Workbench Multisim (www.ni.com/russia).

Програма Electronics Workbench має великі функціональні можливості, тому джерел, що її описують, досить багато. Деякі з них наведено в списку рекомендованої літератури, частину з них розміщено в Інтернеті. Для того, щоб не дублювати в цьому посібнику ці джерела (що

be duplicated in this manual (which is impossible), students are supplied with just brief information about the model libraries of the program that allows them to start studying the Electronics Workbench within this series of laboratory works.

The Electronics Workbench window has a menu bar (Fig. 1.1.1, upper row). Individual menu commands can be invoked by pressing special buttons in the medium row (Fig. 1.1.1). In addition, in the medium row on the right there are three buttons with which you can change the scale of the working field of the program window.

неможливо), нижче наводяться лише ті короткі відомості про бібліотеки моделей програми, які дозволяють почати освоєння Electronics Workbench у межах циклу лабораторних робіт.

Вікно програми Electronics Workbench містить поле меню (верхній ряд рис. 1.1.1). Окремі команди меню можуть додатково викликатися натисканням кнопок, поданих у середньому ряді (рис. 1.1.1). Крім того, у середньому ряді праворуч розміщено три кнопки, за допомогою яких можна змінювати масштаб робочого поля вікна програми.



Fig. 1.1.1. Window of Electronics Workbench
Рис. 1.1.1. Вікно програми Electronics Workbench

The lower row of Fig. 1.1.1 contains buttons for invoking library components and testing instruments. When pressing them, the appropriate library directory appears in the working field. Library directories that are used in this series of laboratory works are presented below.

The second button in the lower row of Fig. 1.1.1 invokes the **Sources** library catalog (Fig. 1.1.2).

У нижньому ряду рис 1.1.1 містяться кнопки виклику бібліотек компонентів і контрольно-вимірвальних приладів. При їх натисканні на робочому полі з'являється каталог відповідної бібліотеки. Нижче наводяться каталоги тих бібліотек, які використовуються в циклі лабораторних робіт.

Друга кнопка нижнього ряду рис. 1.1.1 викликає каталог бібліотеки **Sources** (рис. 1.1.2).

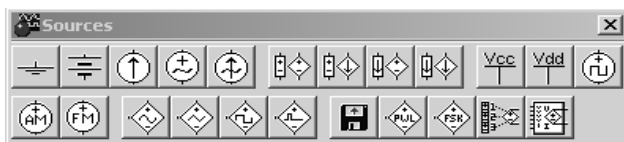


Fig. 1.1.2. Library catalog **Sources**
 Рис. 1.1.2. Каталог бібліотеки **Sources**

To install a component from the catalog in the working field of the program window, you need to place the cursor on the component, press the left button of the mouse and, holding it, move the component to the desired place on the working field. The following components of the **Sources** library will be used in our laboratory works:

– in the upper row of Fig. 1.1.2 (left to right): “Ground”, “DC Voltage”, “DC Current”, “Harmonic Voltage Source”, “Harmonic Current Source”;

– in the lower row of Fig. 1.1.2 (left to right): “Amplitude-Modulated Voltage Source”, “Frequency-Modulated Voltage Source”.

The third button in the lower row of Fig. 1.1.1 invokes the **Basic** library catalog (Fig. 1.1.3).

Для установлення компонента з каталогу на робоче поле вікна програми необхідно поставити курсор на компонент, натиснути ліву клавішу миші і, не відпускаючи її, перенести компонент у потрібне місце робочого поля. З бібліотеки **Sources** будуть використані в циклі лабораторних робіт такі компоненти:

– у верхньому ряду рис. 1.1.2 (зліва направо): «Земля», «Джерело постійної напруги», «Джерело постійного струму», «Джерело гармонічної напруги», «Джерело гармонічного струму»;

– у нижньому ряду рис. 1.1.2 (зліва направо): «Джерело амплітудо-модульованої напруги», «Джерело частотно-модульованої напруги».

Третя кнопка нижнього ряду рис. 1.1.1 викликає каталог бібліотеки **Basic** (рис. 1.1.3).

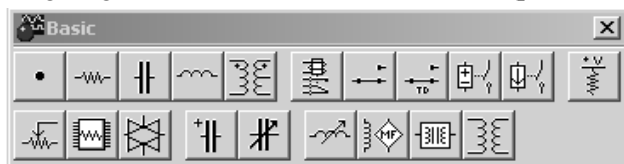


Fig. 1.1.3. Library catalog **Basic**
 Рис. 1.1.3. Каталог бібліотеки **Basic**

The following components of the **Basic** library will be used in our laboratory works:

– in the upper row of Fig. 1.1.3 (left to right): “Node”, “Constant Resistance”, “Constant Capacity”, “Constant Inductance” and the seventh and eighth components in the row “Switches”;

– in the lower row of Fig. 1.1.3 (left to right): “Variable Resistance”, “Variable Capacity” (the fifth component in the row), “Variable Inductance” (the sixth component in the row).

The fourth button in the lower row of Fig. 1.1.1 invokes the **Diodes** library catalog (Fig. 1.1.4).

The following components of the **Diodes** library will be used in our laboratory works: “Diodes” (the first component in the row). This section of the library includes diodes for various applications: rectifier diodes, converter diodes, varicaps, tunnel diodes.

З бібліотеки **Basic** будуть використані в циклі лабораторних робіт такі компоненти:

– у верхньому ряду рис. 1.1.3 (зліва направо): «Вузол», «Постійний опір», «Постійна ємність», «Постійна індуктивність» і сьомий і восьмий компоненти в ряду «Перемикачі»;

– у нижньому ряду рис. 1.1.3 (зліва направо): «Змінний опір», «Змінна ємність» (п'ятий компонент у ряді), «Змінна індуктивність» (шостий компонент у ряду).

Четверта кнопка нижнього ряду рис. 1.1.1 викликає каталог бібліотеки **Diodes** (рис. 1.1.4).

З бібліотеки **Diodes** будуть використані в циклі лабораторних робіт такі компоненти: «Діоди» (перший компонент ряду). У цей розділ бібліотеки входять діоди різного функціонального призначення: випрямні, перетворювальні, варикапи, тунельні.



Fig. 1.1.4. Library catalog **Diodes**
Рис. 1.1.4. Каталог бібліотеки **Diodes**

The fifth button in the lower row of Fig. 1.1.1 invokes the **Transistors** library catalog (Fig. 1.1.5).

П'ята кнопка нижнього ряду рис. 1.1.1 викликає каталог бібліотеки **Transistors** (рис. 1.1.5).

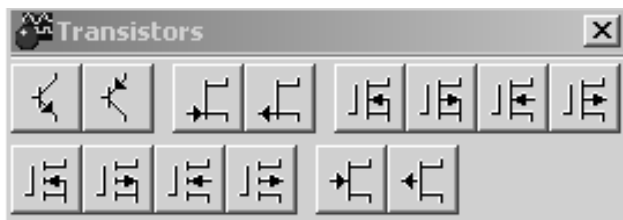


Fig. 1.1.5. Library catalog **Transistors**
 Рис. 1.1.5. Каталог бібліотеки **Transistors**

The following components of the **Transistors** library will be used in our laboratory works: “Bipolar $n-p-n$ Transistors” (the first component in the row), “Bipolar $p-n-p$ Transistors” (the second component in the row).

The sixth button in the lower row of Fig. 1.1.1 invokes the **Indicators** library catalog (Fig. 1.1.6).

З бібліотеки **Transistors** будуть використані в цьому циклі лабораторних робіт такі компоненти: «Біполярні транзистори типу $n-p-n$ » (перший компонент ряду), «Біполярні транзистори типу $p-n-p$ » (другий компонент ряду).

Шоста кнопка нижнього ряду рис. 1.1.1 викликає каталог бібліотеки **Indicators** (рис. 1.1.6).



Fig. 1.1.6. Library catalog **Indicators**
 Рис. 1.1.6. Каталог бібліотеки **Indicators**

The following components of the **Indicators** library will be used in our laboratory works: “Voltmeters” (the first component in the row), “Ammeters” (the second component in the row).

The seventh button in the lower row of Fig. 1.1.1 invokes the **Instruments** library catalog (Fig. 1.1.7).

З бібліотеки **Indicators** будуть використані в циклі лабораторних робіт такі компоненти: «Вольтметри» (перший компонент ряду), «Амперметри» (другий компонент ряду).

Сьома кнопка нижнього ряду рис. 1.1.1 викликає каталог бібліотеки **Instruments** (рис. 1.1.7).

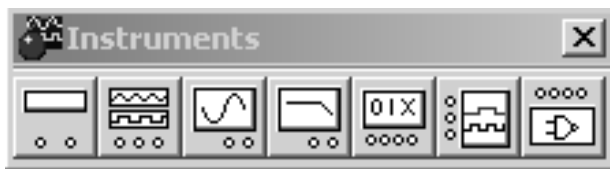


Fig. 1.1.7. Library catalog **Instruments**
Рис. 1.1.7. Каталог бібліотеки **Instruments**

The following components of the **Instruments** library will be used in our laboratory works: “Multimeters” (the first component in the row), “Oscilloscope” (the third component in the row), “AFC and PFC Meters” (the fourth component in the row).

After a component has been installed in the working field of the window, you specify its properties. For this purpose you select the component, then press the **Component Properties** button in the **Circuits** menu (Fig. 1.1.1) after which, in the working field of the window, a component’s individual menu appears in which you set its properties. You can also call the component’s individual menu by pressing the thirteenth button in the medium row on the left (Fig. 1.1.1). A third way to call it is double-clicking the left button of the mouse after placing the cursor on the component.

З бібліотеки **Instruments** будуть використані в циклі лабораторних робіт такі компоненти: «Мультиметри» (перший компонент ряду), «Осцилографи» (третій компонент ряду), «Вимірювачі АЧХ і ФЧХ» (четвертий компонент ряду).

Після установлення компонента на робочому полі вікна необхідно задати його властивості. Для цього компонент виділяється, а потім у меню **Circuits** (див. рис. 1.1.1) натискається кнопка **Component Properties**, після чого на робочому полі вікна з’являється індивідуальне меню компонента, у якому й задаються його властивості. Іншим способом виклику індивідуального меню компонента є натискання тринадцятої кнопки ліворуч у середньому ряду (див. рис. 1.1.1). Третім способом виклику індивідуального меню компонента є подвійне натискання лівою клавішею миші під час установлення курсору на компоненті.

After an instrument has been installed in the working field of the window, its properties are to be specified. This involves the same steps as in setting the properties of components. But in this case an enlarged front panel (not an individual menu) appears in the working field of the window, where you can set the properties of this instrument.

For conveniently connecting components to form a circuit, they should be moved around the surface of the working field. For this purpose, the **Circuits** menu provides the following commands that arrange the graphic images of components on the working field:

- **Rotate** – rotates a component by 90° counterclockwise;

- **Flip Horizontal** – makes mirror imaging of a component in the horizontal plane;

- **Flip Vertical** – makes mirror imaging of a component in the vertical plane.

The same commands can be actuated by pressing the eighth, ninth and tenth buttons in the medium row of the Electronics Workbench window (Fig. 1.1.1).

Smooth movement of the components over the working field

Після встановлення приладу на робочому полі вікна необхідно задати його властивості. Для цього виконуються такі самі дії, що й у разі змінювання властивостей компонент. Але в цьому випадку на робочому полі вікна з'являється не індивідуальне меню, а збільшена лицьова панель приладу, на якій розміщені табло для регулювання властивостей цього приладу.

Для зручності з'єднання компонентів у схему їх необхідно переміщати по площині робочого поля. Для цього в меню **Circuits** передбачені такі команди керування розміщенням графічного зображення компонентів:

- **Rotate** – поворот компонента на 90° проти годинникової стрілки;

- **Flip Horizontal** – дзеркальне відображення компонента по горизонталі;

- **Flip Vertical** – дзеркальне відображення компонента по вертикалі.

Ці ж команди можуть бути виконані натисканням восьмої, дев'ятої й десятої кнопок середнього ряду у вікні програми Electronics Workbench (див. рис. 1.1.1).

Плавне переміщення компонентів у площині робочого поля

can be done with the arrow keys on the computer's keyboard.

After the components have been arranged, their leads are connected with conductors. For this purpose, you place the mouse pointer on a component's lead, and after a black dot appears, you press the left button of the mouse, and a conductor that appears in this case extends to the lead of another component until the a similar black dot appears on it, after which the button of the mouse is released, and so the connection is done. You should bear in mind that only one conductor can be wired to a component's lead. If you need to have other conductors connected to the same lead, you select the black dot in the **Basic** library (the "node" component) and place it on the previously installed conductor. To make the dot black (originally it is red), you click the mouse on the free space of the working field. Another two conductors can be connected to the "Node". If you need to connect a lead to a conductor existing in the circuit, you connect the conductor from the component's lead to the specified conductor by means of the mouse pointer. After the connection dot appears, you release the mouse button.

може виконуватися із клавіатури комп'ютера клавішами зі стрілками.

Після розміщення компонентів їх виводи з'єднуються провідниками. Для приєднання провідників курсор миші підводиться до виводу компонента і після появи чорної точки натискається ліва клавіша. Провідник, що з'являється при цьому, з'єднується з виводом іншого компонента до появи на ньому такої ж чорної точки, після чого клавіша миші відпускається, і з'єднання виконано. До виводу компонента можна приєднувати лише один провідник. Якщо необхідно приєднати до цього виводу інші провідники вибирається в бібліотеці **Basic** чорна точка (компонент «Вузол»), що переноситься на раніше з'єднаний провідник. Щоб точка почорніла (спочатку вона має червоний колір), слід клацнути мишею по вільному простору робочого поля. До «Вузла» можна приєднати ще два провідники. Якщо необхідно приєднати вивід до наявного на схемі провідника, то провідник від виводу компонента курсором підводиться до цього провідника і після появи точки з'єднання клавіша миші відпускається.

To break a connection, you select it with the left button of the mouse and then delete it using the **Delete** key. Connections to the testing instrumentation circuit are done in a similar way.

Work procedure

1. Activate the Electronics Workbench program.

2. Transfer the sources of DC current, DC voltage, AC current, and AC voltage from the **Sources** library onto the working field. Set the following operating parameters of the sources:

– DC voltage supply – 10 V;

– AC voltage supply – 10 V, 1000 Hz;

– DC current supply – 10 mA;

– AC current supply – 10 mA, 1000 Hz.

Change the orientation of these components of the circuit by 90° and shift them 3 positions vertically and horizontally.

3. Transfer the following elements from the **Basic** Library onto the the working field: a fixed and a variable resistor, a fixed and a variable inductance, a fixed and a

Щоб з'єднання розірвати, провідник виділяється лівою клавішею миші, а потім видаляється клавішею **Delete** клавіатури. Підключення до схеми контрольно-вимірювальних приладів здійснюється аналогічно.

Порядок моделювання вимірювань та аналіз його результатів

1. Увімкнути програму Electronics Workbench.

2. З бібліотеки **Sources** на робоче поле перемістити джерела постійного струму та постійної напруги, а також джерела змінного струму та напруги. Установити такі робочі параметри джерел:

– джерела постійної напруги – 10 В;

– джерела змінної напруги – 10 В, 1000 Гц;

– джерела постійного струму – 10 мА;

– джерела змінного струму – 10 мА, 1000 Гц.

Змінити орієнтацію цих джерел на 90° і перемістити їх на 3 позиції по вертикалі й горизонталі.

3. З бібліотеки **Basic** на робоче поле перемістити постійний і змінний резистори, постійну та змінну індуктивності, постійну та змінну ємності. Устано-

variable capacitance. Set the following performance parameters of the passive components:

- fixed resistor – 100 Ω ;
- variable resistor – 10 k Ω , (activation by the “1” key);
- fixed inductance – 100 mH;
- variable inductance – 10 μ H, (activation by the “2” key);
- fixed capacitance – 100 pF;
- variable capacitance – 1000 pF, (activation by the “3” key).


Change the orientation of these components of the circuit by 90° and set the values of the variable elements to the positions “25 %” and “75 %”.

4. Transfer a voltmeter and an ammeter from the **Indicators** library onto the the working field.

Set the following operating parameters of the devices:

- Voltmeter: – inner resistance – 10 M Ω , operating mode – constant voltage;
- Ammeter: – inner resistance – 10 m Ω , operating mode – alternating current.

Change the orientation of the leads of these devices by 90°.

5. Set up a circuit according to Fig. 1.1.8. Activate the simulation of the circuit using  and stop it by pressing “Pause”.

вити такі робочі параметри пасивних компонентів:

- постійного резистора – 100 Ом;
- змінного резистора – 10 kОм, увімкнення клавішею «1»;
- постійної індуктивності – 100 мГн;
- змінної індуктивності – 10 мкГн, увімкнення клавішею «2»;
- постійної ємності – 100 пФ;
- змінної ємності – 1000 пФ, увімкнення клавішею «3»;


Змінити орієнтацію пасивних компонентів схеми на 90° і встановити покажчики змінних елементів у позиції «25 %» і «75 %».

4. З бібліотеки **Indicators** на робоче поле перемістити вольтметр і амперметр.

Установити такі робочі параметри приладів:

- вольтметра – внутрішній опір 10 MОм, режим роботи – постійна напруга;
- амперметра – внутрішній опір 10 mОм, режим роботи – змінний струм.

Змінити орієнтацію виводів даних приладів на 90°.

5. Скласти схему згідно з рис. 1.1.8. запусити моделювання роботи схеми клавішею  і зупинити його клавішею «Pause».

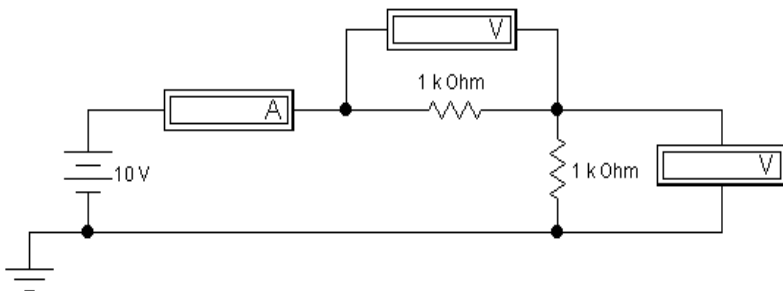




Fig. 1.1.8. Diagram of direct voltage divider
 Рис. 1.1.8. Схема подільника постійної напруги

Make measurements using appropriate instruments. Calculate the currents and voltages in the circuit. Compare the calculations and measurement results, make conclusions.

6. Set up a circuit according to Fig. 1.1.9. (Mind the operation modes of the devices!). Activate the simulation of the circuit using  and stop it by pressing "Pause".

Виконати вимірювання за допомогою приладів та розрахувати струми і напруги у схемі. Порівняти результати вимірювань і розрахунків, зробити висновки.

6. Скласти схему згідно з рис. 1.1.9. (Звернути увагу на режими роботи приладів!). Запустити моделювання роботи схеми клавішею  і зупинити його клавішею «Pause».

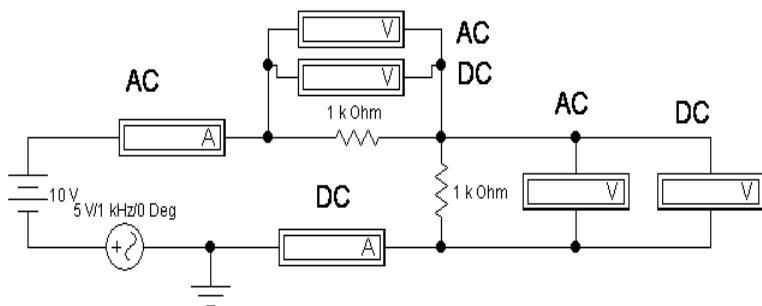


Fig. 1.1.9. Diagram of direct and alternative voltage divider
 Рис. 1.1.9. Схема подільника постійної та змінної напруг

Make measurements using appropriate instruments. Calculate the currents and voltages in the circuit, both direct and alternating. Compare the calculations and measurement results, make conclusions.

7. Take a multimeter from the **Instruments** library and place it on the working field.

Set the following operating parameters of the device:

- Mode of operation – constant current;
- Sort of instrument – Ohmmeter.

Set up a circuit according to Fig. 1.1.10 and study the operation of the ohmmeter.

Виконати вимірювання за допомогою приладів і розрахувати постійні та змінні струми і напруги у схемі. Порівняти результати вимірювань і розрахунків, зробити висновки.

7. З бібліотеки **Instruments** на робоче поле перемістити мультиметр.

Установити такі робочі параметри приладу:

- режим роботи – постійний струм;
- вид приладу – омметр.

Скласти схему згідно з рис. 1.1.10 і дослідити роботу омметра

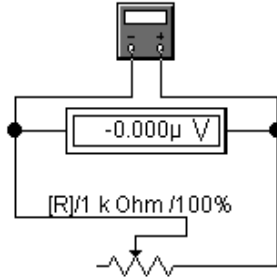




Fig. 1.1.10. Diagram of circuit for multimeter investigation
Рис. 1.1.10. Електрична схема дослідження мультиметра

Activate the simulation of the circuit using  and stop it by pressing "Pause". By varying the resistance of the variable resistor using the "R" key, compare its resistance with the measured value. Also measure the voltage applied

Запустити моделювання роботи схеми клавішею  і зупинити його клавішею «Pause». Змінюючи опір змінного резистора клавішею «R», порівняти його опір з виміряною величиною. Одночасно вимірювати на-

to the resistor, and determine the current at which the measurements are being made. Enter the measurement results into Table 1.1.1. Make conclusions.

пругу, що подається на резистор, і визначати струм, за якого вимірюється опір. Результати занести до табл. 1.1.1. Зробити висновки.

Table 1.1.1. Multimeter investigation data
Таблиця 1.1.1. Дані дослідження мультиметра

R_{resis}										
$R_{\text{meas.}}$										
U										
I										

8. Take an oscilloscope from the **Instruments** library and place it on the working field.

Set the following operating parameters of the device:

- scanning period – 0.2 ms/mark;
- In the channel A – gain 1 V/mark, Vertical shift 0,0;
- In the channel B – gain 1 V/mark, Vertical shift -2.0;

– oscilloscope screen mode –

Reduce.

Set up a circuit according to Fig. 1.1.11 and study the operation of the oscilloscope.

For this purpose:

a) Measure the amplitude and period of a harmonic signal. Compare them with the set values. Draw conclusions;

b) Set the following parameters of the generators: 2 V, 5 kHz. Make the same measurements again;

8. З бібліотеки **Instruments** на робоче поле перемістити осцилограф.

Установити такі робочі параметри приладу:

- період розгортки – 0,2 мс/поділку;
- у каналі А – підсилення 1 В/поділку, зсув по вертикалі 0,0;
- у каналі В – підсилення 1 В/поділку, зсув по вертикалі 2,0;
- режим екрана осцилографа –

Reduce.

Скласти схему згідно з рис. 1.1.11 і дослідити роботу осцилографа.

Для цього:

a) виміряти амплітуду та період гармонічного сигналу. Порівняти результати вимірювання з установленними величинами, зробити висновки;

b) установити параметри генераторів: 2 В, 5 кГц. Повторно виконати вимірювання;

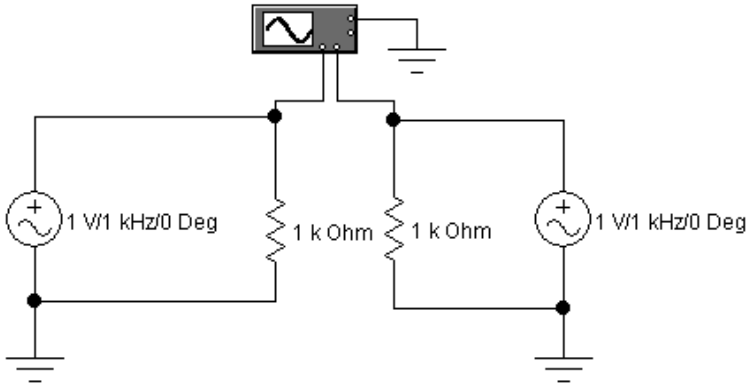


Fig. 1.1.11. Diagram of circuit for phase measuring
Рис. 1.1.11. Електрична схема вимірювання фази

с) Set the oscilloscope screen mode – **Expand**. Measure the amplitude and period of a harmonic signal on the scales of the screen and on the scales of indicators. Compare the results of both measurements; make conclusions;

д) Measure the phase difference between two signals. To do this, set the initial phase on the generator on the left according to Table 1.1.2. Set the oscilloscope screen mode – **Expand**. Make measurements of the angle of the phase shift between the signals of the generators. The measurements are to be made on the scales of the indicators. Enter the measurement results into Table 1.1.2;

е) Changing the parameters of the generator according to

в) увімкнути режим екрана осцилографа **Expand**. Виміряти амплітуду та період гармонічного сигналу за шкалами екрана та шкалами показчиків. Порівняти результати вимірювань, зробити висновки;

г) виміряти різницю фаз між двома сигналами. Для цього встановити на лівому генераторі початкову фазу згідно з табл. 1.1.2. Увімкнути режим екрана осцилографа **Expand**. Виміряти величину кута зсуву фаз між сигналами генераторів. Вимірювання виконувати за шкалами показчиків. Результати вимірювань занести до табл. 1.1.2;

д) змінюючи параметри генератора згідно з табл. 1.1.2, повтор-

Table 1.1.2, make the same measurements and enter their results into the table;

f) Compare the measurement results with the set values; make conclusions.

но виконати вимірювання й занести результати до табл. 1.1.2.

е) порівняти результати вимірювань і встановлені величини, зробити висновки.

Table 1.1.2. Phase measuring data
Таблиця 1.1.2. Дані вимірювання фази

$\varphi_{\text{set on}}, \text{deg.}$	45	90	135	180	225
$\varphi_{\text{measur.}}, \text{deg.}$					

Laboratory work 2

DIRECT CURRENT CIRCUITS

(Estimated time:
2 hours)

Aim of the work. Learning the laws of current flow in direct current circuits through modeling in the Electronics Workbench environment. Studying a direct current circuit with real sources of voltage and current; checking the observance of Kirchhoff's laws as well as that of the power balance condition and the superposition principle in such a circuit. Studying the operation of a voltage divider and that of a current divider.

When preparing for the laboratory work a student should study this description as well as appropriate units of the recommended literature, and be able to answer the following test questions.

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

(Рекомендований обсяг занять:
2 год)

Мета роботи. Вивчити закони струмопроходження в колах постійного струму за допомогою моделювання в середовищі програми Electronics Workbench. Дослідити коло постійного струму з реальними джерелами напруги й струму, перевірити виконання в ньому законів Кірхгофа, умови балансу потужностей і принцип суперпозиції (накладання). Дослідити роботу схем подільника напруги і подільника струму.

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно вивчити відповідний матеріал за рекомендованою літературою, а також уміти відповідати на контрольні запитання.

Test questions

1. Give the definition of an ideal and real voltage source.
2. Give the definition of an ideal and real current source.
3. Give the definition of a branch, a node, and a loop in the circuit.
4. State Kirchhoff's law for currents.
5. State Kirchhoff's law for voltages.
6. State the superposition principle.
7. How are Kirchhoff's laws used for circuit analysis?
8. How is superposition principle used for circuit analysis?
9. What is an ammeter? How are measurements carried out with an ammeter?
10. What is a voltmeter? How are measurements carried out with a voltmeter?

Brief theoretical information

The laws that one should refer to the fundamental laws of current flow are: Ohm's law, Kirchhoff's law for the currents, Kirchhoff's law for voltages, the power balance condition in a circuit, the superposition principle for a linear circuit.

1. Ohm's law. Ohm's law for an electric circuit can be written as follows

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення ідеального та реального джерел напруги.
2. Наведіть визначення ідеального та реального джерел струму.
3. Наведіть визначення гілки, вузла, контуру в колі.
4. Сформулюйте закон Кірхгофа для струмів.
5. Сформулюйте закон Кірхгофа для напруг.
6. Сформулюйте принцип накладання.
7. Як використовуються закони Кірхгофа для аналізу кіл?
8. Як використовується принцип накладання для аналізу кіл?
9. Що таке амперметр? Як виконується вимірювання за допомогою амперметра?
10. Що таке вольтметр? Як виконується вимірювання за допомогою вольтметра?

Основні теоретичні відомості

Основними законами струмопроходження в колі є: закон Ома, закон Кірхгофа для струмів, закон Кірхгофа для напруг, умова балансу потужностей в колі, принцип суперпозиції для лінійного кола.

1. Закон Ома. Закон Ома для ділянки кола може бути записаний у такий спосіб

$$i = \frac{u}{r}, \quad (1.2.1)$$

where i , u , r – instantaneous values of the current, voltage and resistance in this circuit. For example, the voltage drop across the branch ab (Fig. 1.2.1) and the current through it are related by the equation

де i , u , r – миттєві значення струму, напруги й опір розглянутої ділянки. Наприклад, напруга на гілці ab (рис. 1.2.1) і струм через неї зв'язані співвідношенням

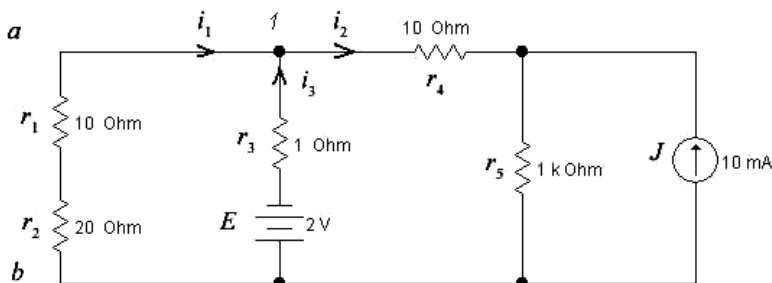


Fig. 1.2.1. Kirchhoff's law for the currents and voltages in circuit
Рис. 1.2.1. Закони Кірхгофа для струмів та напруг у колі

$$i_1 = \frac{u_{ab}}{(r_1 + r_2)}.$$

2. Kirchhoff's law for currents. Algebraic sum of currents in a node equals zero:

2. Закон Кірхгофа для струмів. Алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0, \quad (1.2.2)$$

where i_k – instantaneous value of current in a branch entering a given node. For example, for node I of the circuit in Fig. 1.2.1 we can write:

де i_k – миттєве значення струму тих гілок, що входять до цього вузла. Наприклад, для вузла I схеми на рис. 1.2.1 можна записати:

$$i_1 - i_2 + i_3 = 0.$$

Here currents flowing to the node (i_1, i_2) are written with the “+” sign, and currents flowing from the node (i_3) are written with the “-” sign.

3. Kirhgof’s law for voltages. Algebraic sum of voltages in a loop equals zero:

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0, \tag{1.2.3}$$

where u_k – instantaneous value of voltage in a branch that belongs to a given loop. For example, for the loop $r_1 - r_2 - r_3 - E$ of the circuit in Fig. 1.2.1 we can write, moving clockwise around the loop:

$$u_{r_1} + u_{r_2} - u_{r_3} - E = 0.$$

Here voltages having the same direction as the path-tracing (u_{r_1}, u_{r_2}, E) are written with the “+” sign, and voltages having the opposite direction (counterclockwise motion) (u_{r_3}, E) – with the “-” sign.

4. Power balance condition in a circuit. The sum of the instantaneous values of power of all elements of the circuit equals zero:

Тут струми, напрямлені до вузла (i_1, i_2) , записуються зі знаком «+», а струми, напрямлені від вузла (i_3) – зі знаком «-».

3. Закон Кірхгофа для напруг. Алгебраїчна сума напруг у контурі дорівнює нулю:

де u_k – миттєве значення напруги до тієї гілки, що належить цьому контуру. Наприклад, для контуру $r_1 - r_2 - r_3 - E$ схеми на рис. 1.2.1 можна записати, обходячи контур у напрямку руху годинникової стрілки:

Тут напруга, що збігається за напрямком з напрямком обходу контуру (u_{r_1}, u_{r_2}, E) , записується зі знаком «+», а напруги, протилежні за напрямком обходу контуру (u_{r_3}, E) – зі знаком «-».

4. Умова балансу потужності в колі. Сума миттєвих потужностей всіх елементів кола дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n p_k = 0. \tag{1.2.4}$$

As power supplies (active elements of the circuit) supply energy, and loads (passive elements of the circuit) consume it, then it follows from (1.2.4) that:

$$\sum_{k=1}^n P_{k,\text{source}} = \sum_{l=1}^m P_{l,\text{consumer}}, \quad (1.2.5)$$

where

$$P_{k,\text{source}} = U_k I_k, \quad P_{l,\text{consumer}} = I_l^2 r_l. \quad (1.2.6)$$

For example, for the circuit in Fig. 1.2.1 the source of voltage E and the source of current J supply power. The consumers of this power are resistors r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 .

5. Superposition principle (superposition theorem). The response of a linear electric circuit to an arbitrary action, which is a linear combination of simpler actions, is equal to a linear combination of the responses caused by each individual action. For example, the circuit in Fig.1.2.1 is acted on by one voltage source and one current source. Currents in the branches and voltage drops across the branches are the response of the circuit. If we measure an arbitrary response (for example, the current in the branch ab) when there is only the voltage source in the circuit (let the response be i_1'), then we measure the same response when

Оскільки джерела енергії (активні елементи кола) віддають енергію, а навантаження (пасивні елементи кола) її споживають, то з рівняння (1.2.4) випливає:

Наприклад, для схеми на рис. 1.2.1 віддають енергію одне джерело напруги E і одне джерело струму J . Споживачами енергії є резистори r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 .

5. Принцип суперпозиції (теорема накладання). Реакція лінійного електричного кола на довільний вплив, що являє собою лінійну комбінацію більш простих впливів, дорівнює лінійній комбінації реакцій, викликаних кожним із впливів окремо. Наприклад, для схеми на рис. 1.2.1 на коло впливають одне джерело напруги й одне джерело струму. Реакцією кола є струми і падіння напруги в гілках. Якщо виміряти довільну реакцію (наприклад, струм у гілці ab) під час увімкнення в коло лише джерела напруги (нехай це буде i_1'), вимірювати ту ж реакцію під час увімкнення в

there is only the current source in the circuit (let the response be i_1''), and lastly, we measure the response with both sources simultaneously (the response i_1), the result will be:

$$i_1 = i_1' + i_1'' .$$

Work procedure

1. Study the observance of Kirchhoff's laws as well as that of the power balance condition and the superposition principle in a circuit with real sources of voltage and current. For this purpose set up a measuring circuit according to Fig. 1.2.2

Порядок моделювання вимірювань та аналіз його результатів

1. Дослідити виконання законів Кірхгофа й умови балансу потужностей у колі постійного струму з реальними джерелами напруги і струму. Для цього скласти вимірювальну схему згідно з рис. 1.2.2.

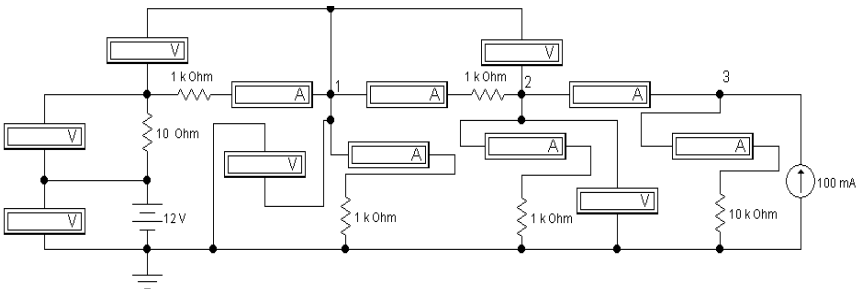


Fig. 1.2.2. Measuring circuit for fulfilling of Kirchhoff's laws
Рис. 1.2.2. Електрична схема для дослідження законів Кірхгофа

1.1. Measure the currents in all the branches and the voltage drops across all the branches.

1.2. Draw the circuit, mark on it all the measured values, and mark with arrow the direction of currents and voltages.

1.1. Виміряти струми у всіх гілках і падіння напруг на всіх елементах гілок.

1.2. Скласти схему, позначити на ній всі виміряні величини, а також позначити стрілками напрямки струмів і напруг.

1.3. Verify:

- the observance of Kirchhoff's law for currents in nodes 1, 2, 3 (equation 1.2.2);
- the observance of Kirchhoff's law for voltages in all the loops (equation 1.2.3);
- the observance of power balance condition (equation 1.2.5 and 1.2.6).

1.4. Make conclusions.

1.5. Double the ratings of all resistances of the circuit in Fig. 1.2.2 and repeat the actions according to 1.1–1.4.

2. Compose a system of Kirchhoff's equations for the circuit in Fig. 1.2.2. Solve the system to obtain the values of all currents in the branches and all voltage drops across the branches. Compare the calculated values with measured ones.

3. Study the observance of the superposition principle in a direct-current circuit with real sources of voltage and current. For this purpose set up a measuring circuit according to Fig. 1.2.2.

3.1. On the voltage source, set a value of 0 volts (in this way excluding it from the circuit). Take measurements of the currents in all the branches and the voltage drops across all the branches.

3.2. Draw the circuit, mark on it all the measured values, and mark with arrow the direction of currents and voltages.

1.3. Перевірити:

- виконання закону Кірхгофа для струмів у вузлах 1, 2, 3 (рівняння (1.2.2));
- виконання закону Кірхгофа для напруг у всіх контурах (рівняння (1.2.3));
- виконання умови балансу потужностей (рівняння (1.2.5), (1.2.6)).

1.4. Зробити висновки.

1.5. Збільшити номінали всіх опорів схеми (рис. 1.2.2) у 2 рази, повторити дії згідно з пп. 1.1–1.4.

2. Скласти систему рівнянь Кірхгофа для схеми (рис. 1.2.2). Розв'язати систему, отримати розрахункові значення для всіх струмів у гілках і всіх падінь напруги на елементах гілок. Порівняти розрахункові величини з вимірними.

3. Дослідити виконання принципу суперпозиції в колі постійного струму з реальними джерелами напруги й струму (рис. 1.2.2).

3.1. Установити на джерелі напруги номінал 0 В (тим самим, вимкнувши його з кола). Виміряти струми у всіх гілках і падіння напруги на всіх елементах гілок.

3.2. Скласти схему, відзначити на ній всі вимірні величини, а також позначити стрілками напрямки струмів і напруг.

3.3. On the current source, set a value of 0 amperes (in this way excluding it from the circuit). Take measurements of the currents in all the branches and the voltage drops across all the branches.

3.4. Draw the circuit, mark on it all the measured values, and mark with arrow the direction of currents and voltages.

3.5. Verify the observance of the superposition principle (superposition theorem) for the circuit being investigated.

3.6. Make conclusions.

4. Study the operation of a voltage divider. For this purpose set up a circuit according to Fig. 1.2.3.

4.1. Measure the voltages across the elements of the divider and enter their values to Table 1.2.1.

4.2. Calculate the voltages across the elements of the divider according to formula and enter their values to Table. 1.2.1.

4.3. Compare the calculated values with the measured ones and make conclusions.

5. Study the operation of a current divider. For this purpose set up a circuit according to Fig. 1.2.4.

5.1. Measure the currents in the branches of the divider and enter their values to Table 1.2.2.

3.3. Установити на джерелі струму номінал 0 А (тим самим, вимкнувши його з кола). Виміряти струми у всіх гілках і падіння напруги на всіх елементах гілок.

3.4. Скласти схему, відзначити на ній всі виміряні величини, а також позначити стрілками напрямки струмів і напруг.

3.5. Перевірити виконання принципу суперпозиції (теорема накладання) для досліджуваного кола.

3.6. Зробити висновки.

4. Дослідити роботу схеми подільника напруги. Для цього скласти схему згідно з рис. 1.2.3.

4.1. Виміряти напруги на елементах подільника й занести їх значення до табл. 1.2.1.

4.2. Розрахувати напруги на елементах подільника згідно з формулою і занести їх значення до табл. 1.2.1.

4.3. Порівняти розрахункові значення з вимірними та зробити висновки.

5. Дослідити роботу схеми подільника струму. Для цього скласти схему згідно з рис. 1.2.4.

5.1. Виміряти струми в гілках подільника й занести їх значення до табл. 1.2.2.

5.2. Calculate the voltages across the elements of the divider according to formula and enter their values to Table 1.2.2.

5.2. Розрахувати напруги на елементах подільника згідно з формулою і занести їх значення до табл. 1.2.2.

$$U_1 = \frac{Er_1}{r + r_1 + r_2 + r_3}, U_2 = \frac{Er_2}{r + r_1 + r_2 + r_3}, U_3 = \frac{Er_3}{r + r_1 + r_2 + r_3}.$$

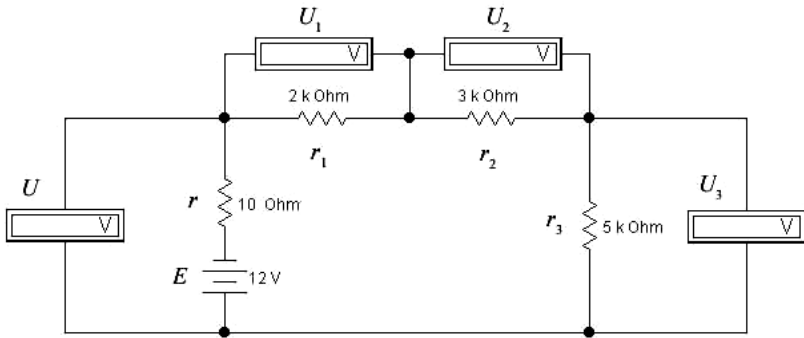


Fig. 1.2.3. Diagram of voltage divider

Рис. 1.2.3. Схема подільника напруг

Table 1.2.1. Calculated and measured voltages

Таблиця 1.2.1. Значення розрахованих та вимірянних напруг

Parameters	U	U_1	U_2	U_3
The measured value				
The calculated value				

$$I = \frac{E}{r + \frac{1}{g}}, I_1 = \frac{I g_1}{g}, I_2 = \frac{I g_2}{g}, I_3 = \frac{I g_3}{g},$$

$$g_1 = \frac{1}{r_1}, g_2 = \frac{1}{r_2}, g_3 = \frac{1}{r_3}, g = g_1 + g_2 + g_3.$$

5.3. Compare the calculated values with the measured ones and make conclusions.

5.3. Порівняти розрахункові значення з виміряними й зробити висновки.

Table 1.2.2. Calculated and measured currents

Таблиця 1.2.2. Значення розрахованих та вимірених струмів

Parameters	I	I_1	I_2	I_3
The measured value				
The calculated value				

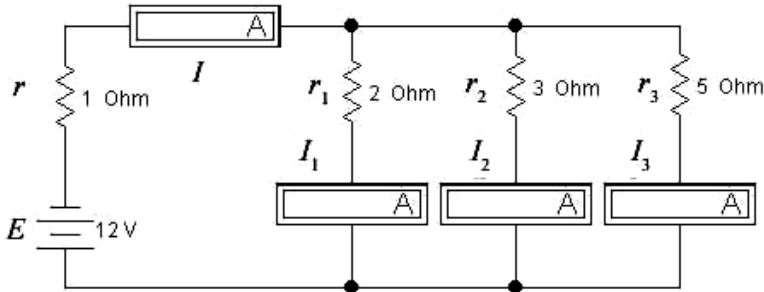


Fig. 1.2.4. Diagram of current divider
Рис. 1.2.4. Схема подільника струмів

6. In the experimentation paper give all the results of measurements, verifications and calculations as well as the conclusions made by the student.

6. У протоколі лабораторної роботи навести результати вимірювань, перевірок і розрахунків, а також зроблені висновки.

Laboratory work 3

ALTERNATING CURRENT CIRCUITS

(Estimated time:
2 hours)

Aim of the work. Learning the laws of current flow in AC circuits through modeling in the Electronics Workbench environment. Studying AC circuits with series and parallel connection of reactive elements, verify them

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ

(Рекомендований обсяг занять:
2 год)

Мета роботи. Вивчити закони струмопроходження в колах змінного струму за допомогою моделювання в середовищі програми Electronics Workbench. Дослідити кола змінного струму з послідовним і паралельним

according to Ohm's and Kirchhoff's laws in the complex form and verify the observance of power balance condition in such circuits.

When preparing for the laboratory work a student should study this description as well as appropriate units of the recommended literature, and be able to answer the following test questions.

Test questions

1. What is the harmonic current and harmonic voltage? What parameters are they characterized by?

2. How can the harmonic current be represented through complex variables?

3. What is the main point of the complex amplitude method?

4. State Ohm's law in the complex form.

5. State Kirchhoff's law for currents in the complex form.

6. State Kirchhoff's law for voltages in the complex form.

7. What is the active and reactive power?

8. State the power balance condition in a harmonic current circuit.

9. What is a vector diagram? Give examples of vector diagrams for resistance, inductance and capacitance.

Brief theoretical information

The basic laws of current flow in a harmonic current circuit are:

ввімкненнями реактивних елементів, перевірити виконання в них закону Ома, законів Кірхгофа в комплексній формі й умови балансу потужностей.

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно вивчити відповідний матеріал за рекомендованою літературою, а також уміти відповідати на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Що таке гармонічний струм і гармонічна напруга? Якими параметрами вони характеризуються?

2. Як гармонічні струми виражаються комплексними величинами?

3. У чому сутність методу комплексних амплітуд?

4. Сформулюйте закон Ома в комплексній формі.

5. Сформулюйте закон Кірхгофа для струмів у комплексній формі.

6. Сформулюйте закон Кірхгофа для напруг у комплексній формі.

7. Що таке активна й реактивна потужності?

8. Сформулюйте умову балансу потужностей в колі гармонічного струму.

9. Що таке векторна діаграма? Наведіть приклади векторних діаграм для опору, індуктивності та ємності.

Основні теоретичні відомості

Основними законами струмопроходження в колі гармоні-

Ohm's law, Kirchhoff's law for currents, Kirchhoff's law for voltages, and the power balance condition in a circuit.

1. Ohm's law in the complex form.

Ohm's law in the complex form for a circuit can be written as follows:

$$\dot{I}_m = \dot{U}_m / Z,$$

where \dot{I}_m , \dot{U}_m – complex amplitudes of voltage and current, Z – complex impedance of the circuit.

2. Kirchhoff's law for currents in the complex form.

The sum of complex currents in a node is equal to zero:

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_{mk} = 0,$$

where \dot{I}_{mk} – complex amplitude of the current in the k -th branch convergent to a given node.

3. Kirchhoff's law for voltages in the complex form.

The sum of complex voltages in a circuit is equal to zero:

$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_{mk} = 0,$$

where \dot{U}_{mk} – complex amplitude of the voltage of k -th branch in a given circuit.

4. The power balance condition in a harmonic current circuit.

чного струму є: закон Ома, закон Кірхгофа для струмів, закон Кірхгофа для напруг, умова балансу потужностей в колі.

1. Закон Ома в комплексній формі.

Закон Ома в комплексній формі для ділянки кола можна записати таким чином:

де \dot{I}_m , \dot{U}_m – комплексні амплітуди струму і напруги; Z – комплексний опір кола.

2. Закон Кірхгофа для струмів у комплексній формі.

Сума комплексних струмів у вузлі дорівнює нулю:

де \dot{I}_{mk} – комплексна амплітуда струму тих гілок, що сходяться до цього вузла.

3. Закон Кірхгофа для напруг у комплексній формі.

Сума комплексних напруг у контурі дорівнює нулю:

де \dot{U}_{mk} – комплексна амплітуда напруги гілок, що належать до цього контуру.

4. Умова балансу потужності в колі гармонічного струму.

The sum of complex, active and reactive powers of all elements of a circuit is equal to zero:

$$\sum_{k=1}^n \tilde{S}_k = \sum_{k=1}^n (P_k + jQ_k) = 0, \quad \sum_{k=1}^n P_k = 0, \quad \sum_{k=1}^n Q_k = 0. \quad (1.3.1)$$

As energy sources (active elements of the circuit) supply energy, and consumers (passive elements of the circuit) use it, then from (1.3.4) it follows that:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n P_{k,\text{source}} &= \sum_{l=1}^m P_{l,\text{consumer}}, & \sum_{k=1}^n Q_{k,\text{source}} &= \sum_{l=1}^m Q_{l,\text{consumer}}, \\ P_{k,\text{source}} &= U_k I_k \cos \varphi_k, & P_{l,\text{consumer}} &= I_l^2 r_l, \\ Q_{k,\text{source}} &= U_k I_k \sin \varphi_k, & Q_{l,\text{consumer}} &= I_l^2 x_l, \end{aligned}$$

where r_1, x_1 – active and reactive resistances of the consumers, φ – phase shift between the voltage across an element and the current through this element:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

5. Vector diagrams.

Complex currents, voltages and resistances are represented on a complex plane with vectors whose length is proportional to the modulus (of current, voltage or resistance), and the angle of rotation about the x -axis – to their phase. A diagram representing a set of vectors on the complex

Сума комплексних, активних і реактивних потужностей всіх елементів кола дорівнює нулю:

Оскільки джерела енергії (активні елементи кола) віддають енергію, а приймачі (пасивні елементи кола) її споживають, то з рівняння (1.3.1) випливає:

де r_1, x_1 – активні й реактивні опори приймачів; φ – зсув фаз між напругою на елементі та струмом через елемент:

5. Векторні діаграми.

Комплексні струми, напруги й опори зображуються на комплексній площині за допомогою векторів, довжина яких пропорційна модулю (струми, напруги або опори), а кут повороту відносно осі абсцис – їх фазі. Діаграма, що являє собою сукупність векторів на комплексній площині, назива-

plane is called a vector diagram. Fig. 1.3.1 shows a vector diagram of complex values of voltage and current for resistance. Fig. 1.3.2 shows a vector diagram of complex values of voltage and current for inductance. Fig. 1.3.3 shows a vector diagram of complex values of voltage and current for capacitance. Voltages and currents in these diagrams are presented to scale.

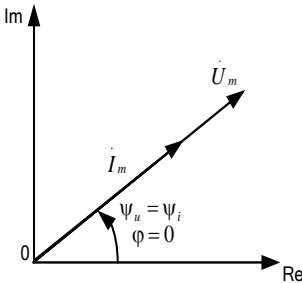


Fig. 1.3.1. Resistance vector diagram
Рис. 1.3.1. Векторна діаграма опору

Working Procedure

1. Study the observance of Ohm's law in the complex form for a one-component circuit.

1.1. Set up a circuit according to fig. 1.3.4, a.

1.2. Calculate the complex impedance Z of the circuit and enter its value to table. 1.3.1

ється векторною діаграмою. Векторну діаграму комплексних величин напруги та струму для опору показано на рис. 1.3.1, векторну діаграму комплексних величин напруги та струму для індуктивності – на рис. 1.3.2, векторну діаграму комплексних величин напруги та струму для ємності – на рис. 1.3.3. На діаграмах струми й напруги показано у відповідних масштабах.

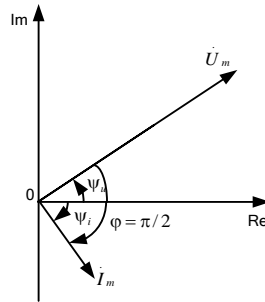


Fig. 1.3.2. Inductance vector diagram
Рис. 1.3.2. Векторна діаграма індуктивності

Порядок моделювання вимірювань та аналіз його результатів

1. Дослідити виконання закону Ома в комплексній формі в колі з одним елементом.

1.1. Скласти коло згідно з рис. 1.3.4, а.

1.2. Розрахувати комплексний опір кола Z і занести його значення до табл. 1.3.1.

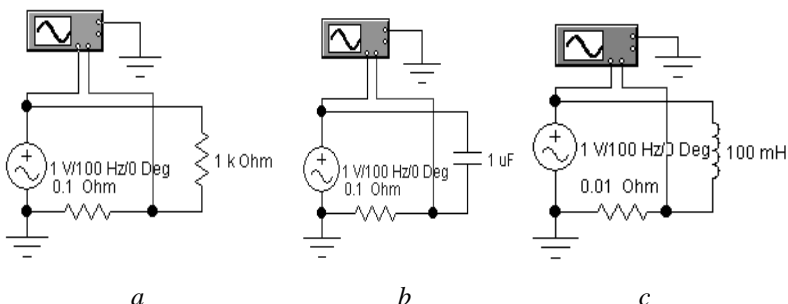


Fig. 1.3.3. Measuring circuit for fulfilling of Ohm's laws in complex form
 Рис. 1.3.3. Електричне коло для дослідження закону Ома в комплексній формі

1.3. Measure the current in the circuit and the phase shift between the voltage and the current. Enter the measured data to Table 1.3.1. Use these data to calculate the ratio between the complex amplitude of the voltage source to that of the current \dot{U}_m / \dot{I}_m and enter its value to Table 1.3.1.

1.3. Виміряти струм у колі та зсув фаз між напругою і струмом. Виміряні дані занести до табл. 1.3.1. За виміряними даними розрахувати відношення комплексних амплітуд напруги джерела й струму \dot{U}_m / \dot{I}_m і занести його значення до табл. 1.3.1.

Table 1.3.1. Data for fulfilling of Ohm's laws in complex form
 Таблиця 1.3.1. Дані щодо аналізу закону Ома в комплексній формі

Parameters	Fig. 1.3.4, a	Fig. 1.3.4, б	Fig. 1.3.4, в	Fig. 1.3.5	Fig. 1.3.6
Z , Ohm					
I , mA					
φ , deg					
\dot{U}_m / \dot{I}_m , Ohm					

1.4. Compare the values of Z and \dot{U}_m / \dot{I}_m . Draw conclusions.

1.4. Порівняти величини Z і \dot{U}_m / \dot{I}_m . Зробити висновки.

1.5. Set up a circuit according to Fig. 1.3.4, b. Repeat the steps in accordance with pts. 1.1–1.4.

1.5. Скласти коло згідно з рис. 1.3.4, b. Повторити дії згідно з п.п. 1.1–1.4.

1.6. Set up a circuit according to Fig 1.3.4, c. Repeat the steps in accordance with pts. 1.1–1.4.

2. Study the observance of Ohm's law, Kirchhoff's laws and the power balance conditions in the complex form for a series circuit. For this purpose set up a circuit according to Fig. 1.3.5.

1.6. Скласти коло згідно з рис. 1.3.4, c. Повторити дії згідно з п.п. 1.1–1.4.

2. Дослідити виконання закону Ома, законів Кірхгофа й умови балансу потужностей у комплексній формі в колі з послідовним з'єднанням елементів. Для цього скласти коло згідно з рис. 1.3.5.

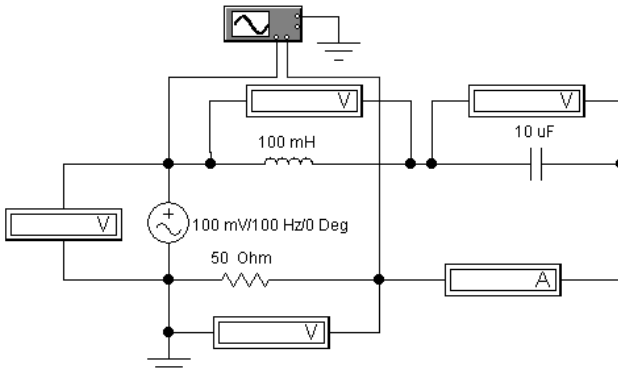


Fig. 1.3.5. Diagram of series RLC-circuit
Рис. 1.3.5. Схема послідовного RLC-кола

2.1. Measure the currents in the circuit and the voltage drop on each element as well as the phase shift between the current and EMF of the voltage source. Enter the measured data to Table. 1.3.2.

2.1. Виміряти струми у колі та падіння напруги на всіх елементах, а також величину зсуву фаз між струмом і ЕРС джерела напруги. Результати занести до табл. 1.3.2.

Table 1.3.2. Data for analyzing series RLC-circuit
Таблиця 1.3.2. Дані аналізу послідовного RLC-кола

$C, \mu\text{F}$	10	25	50
U_R, V			
U_C, V			
U_L, V			
I, mA			
$\varphi, \text{deg.}$			

2.2. Verify Ohm's law in the complex form. For this purpose repeat the actions in accordance with pts. 1.1-1.4 for the circuit under study.

2.3. Verify Kirchhoff's law in the complex form for voltages in a circuit. To do this, use the measured data to construct a vector diagram on the complex plane for complex voltages in the circuit.

2.4. Check the power balance conditions in a harmonic current circuit. To do this, use the measured data to calculate the values of active and reactive power of the sources and consumers in the circuit under study and compare them to each other.

2.5. In the circuit set up according to Fig. 1.3.5, change the nominal capacity according to Table 1.3.2 and repeat the steps described in pts. 2.1-2.4.

2.6. Draw conclusions.

3. Verify the observance of Kirchhoff's laws and check the power balance conditions in the complex form in a series-parallel circuits. To do this, set up a circuit according to Fig. 1.3.6.

3.1. Measure the currents in the circuit and the voltage drop on each element as well as the phase shift between the current and EMF

2.2. Перевірити виконання закону Ома в комплексній формі. Для цього для досліджуваного кола повторити дії згідно з п.п. 1.1-1.4.

2.3. Перевірити виконання закону Кірхгофа в комплексній формі для напруг у колі. Для цього на основі даних вимірювань побудувати векторну діаграму на комплексній площині для комплексних напруг у колі.

2.4. Перевірити виконання умови балансу потужностей у колі гармонічного струму. Для цього на основі даних вимірювань розрахувати величини активних і реактивних потужностей джерел і споживачів у досліджуваному колі й порівняти їх між собою.

2.5. У колі, зображеному на рис. 1.3.5, змінити значення номіналу ємності згідно з даними табл. 1.3.2 і повторити дії згідно з п.п. 2.1-2.4.

2.6. Зробити висновки.

3. Дослідити виконання законів Кірхгофа й умови балансу потужностей у комплексній формі в колі зі змішаним з'єднанням елементів. Для цього скласти коло згідно з рис. 1.3.6.

3.1. Виміряти струми у колі й падіння напруги на всіх елементах, а також величину зсуву фаз між струмом і ЕРС джерела на-

of the voltage source. Enter the measured data to Table.1.3.3.

3.2. Verify Ohm's law in the complex form. To do this, repeat the actions described in pts. 1.1–1.4 for the circuit under study.

пруги. Результати занести до табл. 1.3.3.

3.2. Перевірити виконання закону Ома в комплексній формі. Для цього для досліджуваного кола повторити дії згідно з п.п. 1.1–1.4.

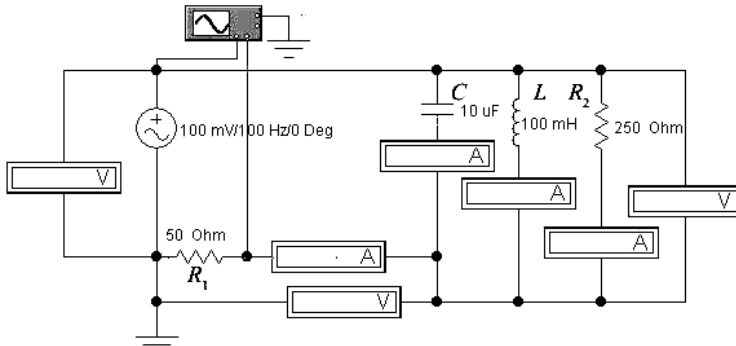


Fig. 1.3.6. Diagram of parallel RLC-circuit
Рис. 1.3.6. Схема паралельного RLC-кола

3.3. Verify Kirchhoff's law in the complex form for voltages in a circuit. To do this, construct a vector diagram on the complex plane for complex voltages in the circuit.

3.4. Verify Kirchhoff's law in the complex form for currents in a circuit. To do this, construct a vector diagram on the complex plane for complex currents in the circuit.

3.5. Check the power balance conditions in a harmonic current circuit. To do this, use the measured data to calculate the values of active and reactive power of the sources and consumers in the cir-

3.3. Перевірити виконання закону Кірхгофа в комплексній формі для напруг у колі. Для цього побудувати векторну діаграму на комплексній площині для комплексних напруг.

3.4. Перевірити виконання закону Кірхгофа в комплексній формі для струмів у колі. Для цього побудувати векторну діаграму на комплексній площині для комплексних струмів.

3.5. Перевірити виконання умови балансу потужностей у колі гармонічного струму. Для цього на підставі даних вимірювань розрахувати величини активних і реактивних потужностей джерел і спо-

cuit under study and compare them to each other.

3.6. In the circuit set up according to Fig. 1.3.6, change the nominal capacity and repeat the steps described in pts. 3.1–3.5.

3.7. Draw conclusions.

живачів у досліджуваному колі й порівняти їх між собою.

3.6. У колі згідно з рис. 1.3.6 змінити значення номіналу ємності й повторити дії згідно з п.п. 3.1–3.5.

3.7. Зробити висновки.

Table 1.3.3. Data for analyzing parallel RLC-circuit
Таблиця 1.3.3. Дані аналізу паралельного RLC-кола

C , μF	10	25	40
U_{R1} , V			
U_C , V			
I_{R1} , mA			
I_{R2} , mA			
I_L , mA			
I , mA			
φ , deg.			

Laboratory work 4

Frequency characteristics of linear circuits

(Estimated time:
2 hours)

Aim of the work. Learning the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of simplest rC - and rL alternating current circuits by means of modeling in the Electronics Workbench environment. Studying rC - and rL - AC circuits of the first, second and third order. Plotting the amplitude-frequency characteristic, phase-frequency characteristic and the

Лабораторна робота 4

Дослідження частотних характеристик лінійних кіл

(Рекомендований обсяг занять:
2 год)

Мета роботи. Вивчити амплітудно-частотні (АЧХ) й фазо-частотні характеристики (ФЧХ) найпростіших rC - і rL -кіл змінного струму за допомогою моделювання в середовищі програми Electronics Workbench. Дослідити rC - і rL -кола змінного струму першого, другого й третього порядків. Побудувати графіки АЧХ,

frequency locus for the circuits under study.

To be well prepared for this laboratory work, it is necessary to study the present description as well as appropriate units of the recommended literature, and be able to answer the following

Test questions

1. What is a complex function of the circuit? What parameters is it characterized by?
2. What are the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the circuit?
3. What are the real-frequency and imaginary-frequency characteristics of the circuit?
4. What is the frequency locus?
5. What are complex input resistance and conductivity?
6. What are a complex transfer resistance and conductivity?
7. What are complex voltage transmission coefficient and current complex current transmission coefficient?
8. Give examples of rC - and rL -circuits of the first and second order.
9. How to measure the complex voltage transmission coefficient for rC - and rL -circuits?
10. How to calculate the complex voltage transmission coefficient for rC - and rL -circuits?

Brief theoretical information

The complex function of a circuit is the ratio of complex voltage

ФЧХ і частотний годограф для досліджених кіл.

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно вивчити відповідний матеріал за рекомендованою літературою, а також уміти відповідати на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Що таке комплексна функція кола? Якими параметрами вона характеризується?
2. Що таке АЧХ й ФЧХ кола?
3. Що таке дійсно-частотна (ДЧХ) й уявно-частотна характеристики (УЧХ) кіл?
4. Що таке частотний годограф?
5. Що таке комплексні передатні входні опори й провідність?
6. Що таке комплексні передатні опори і провідності?
7. Що таке комплексні коефіцієнти передачі за напругою й струмом?
8. Наведіть приклади rC - і rL - кіл першого та другого порядків.
9. Як виміряти комплексний коефіцієнт передачі за напругою rC - і rL -кола?
10. Як розрахувати комплексний коефіцієнт передачі за напругою rC - і rL -кола?

Основні теоретичні відомості

Комплексна функція кола являє собою відношення комплексних напруг і струмів, що

es and currents at the output of the circuit X_{out} (response) to those at its input X_{in} (stimulus) when the stimulus is harmonic. Depending on the physical meaning of the stimulus and response of the circuit (voltage or current) and their localization points (input and output of the circuit), we can speak about different types of complex functions of a circuit. Assume that there is a voltage U_1 and a current I_1 at the input 1–1' of a linear circuit without nonautonomous sources (Fig. 1.4.1). Select an element Z_2 at the output of the circuit in which there is a voltage U_2 and a current I_2 . Then the input complex functions of the circuit will be:

$$Z_{IN}(j\omega) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}; \quad Y_{IN}(j\omega) = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1},$$

these are the complex input resistance and conductance.

The complex transfer functions of the circuit are:

$$Z_{21}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}; \quad Z_{12}(j\omega) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2}; \quad Y_{12}(j\omega) = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}; \quad Y_{21}(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1},$$

These are the complex transfer resistance and conductance:

$$K_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}; \quad K_I(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1},$$

діють на виході $X_{\text{вих}}$ (реакція) і на вході $X_{\text{вх}}$ (вплив) кола в разі гармонічного впливу. Залежно від фізичного змісту впливу й реакції кола (напруги або струму) і місць їх локалізації (входу і виходу кола) виділяють різні комплексні функції кола. Нехай на вході 1–1' лінійного кола, що не містить неавтономних джерел (рис. 1.4.1), діють напруга U_1 і струм I_1 . Виділимо елемент Z_2 на виході кола, на якому діють напруга U_2 і струм I_2 . Тоді вхідними комплексними функціями кола будуть:

що є комплексними вхідними опорами і провідностями.

Перехідні комплексні функції кола:

що є комплексними передатними опорами й провідностями:

these are complex transfer functions or transfer coefficients of voltage and current.

що є комплексними передатними функціями або коефіцієнтами передачі за напругою і струмом.

Complex functions of the circuit can be represented in the exponential or algebraic form:

Комплексні функції кола можна подати у показниковій або алгебричній формі:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{\dot{X}_{OUT}}{\dot{X}_{IN}} = K(j\omega)e^{j\varphi(\omega)} = R(\omega) + jX(\omega),$$

where components of complex functions are frequency characteristic: 1) amplitude-frequency characteristic (AFC):

де компонентами комплексної функції кола є частотні характеристики кола: 1) АЧХ:

$$K(\omega) = \text{Mod} \dot{K}(j\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + X^2(\omega)};$$

2) phase-frequency characteristic (PhFC):

2) ФЧХ:

$$\varphi(\omega) = \arg \dot{K}(j\omega) = \arctg \frac{X(\omega)}{R(\omega)};$$

3) real frequency characteristic (RFC):

3) ДЧХ:

$$R(\omega) = \text{Re} \dot{K}(j\omega) = K(\omega) \cos \varphi(\omega);$$

4) imaginary-frequency characteristic (IFC):

4) УЧХ:

$$X(\omega) = \text{Im} \dot{K}(j\omega) = K(\omega) \sin \varphi(\omega).$$

A complex function of a circuit that combines amplitude-to-phase ratios is called amplitude-phase-frequency characteristic (APhFC). A graph of the APhFC can be constructed on a plane as a parametric function of frequency,

Комплексна функція кола, що поєднує співвідношення амплітуд і фаз, називають амплітудно-фазочастотною характеристикою (АФЧХ). Графік АФЧХ може бути побудований на площині як параметрична функ-

a so-called frequency locus. The procedure of its construction is given in [3].

ця частоти (частотний годограф). Методику його побудови наведено у праці [3].

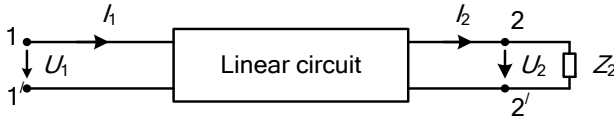


Fig. 1.4.1. Block diagram of linear circuit

Рис. 1.4.1. Схема лінійного кола

Consider some examples of AFC and PhFC of a complex voltage transfer coefficient for simplest rC - and rL -AC circuits.

Fig. 1.4.2 and 1.4.3 show rC - and rL -circuits of the first order, each having one reactive element in its structure. Frequency characteristics of these circuits are calculated using Kirchoff's equations. For circuits in Fig. 1.4.2 they are:

Розглянемо приклади АЧХ і ФЧХ комплексного коефіцієнта передачі за напругою найпростіших rC - і rL -кіл змінного струму.

На рис. 1.4.2 і 1.4.3 показано rC - і rL -кола першого порядку (що мають у своєму складі один реактивний елемент). Частотні характеристики цих кіл розраховуються методом рівнянь Кірхгофа. Для кіл на рис. 1.4.2 вони такі:

$$K_U(\omega) = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \text{arctg}(\omega\tau),$$

where $\tau = rC$ or $\tau = \frac{L}{r}$ respectively. For circuits in Fig. 1.4.3 they are:

де $\tau = rC$ або $\tau = \frac{L}{r}$ відповідно. Для кіл, зображених на рис. 1.4.3, вони такі:

$$K_U(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = -\text{arctg}(\omega\tau),$$

where $\tau = rC$ or $\tau = \frac{L}{r}$ respectively. Fig. 1.4.4 and 1.4.5 show rC - and rL -circuits of the second-order, each having two reactive elements in its structure. Frequency characteristics of these more difficult circuits will be calculated by the method of loop currents or node voltages. For circuits in Fig. 1.4.4 they are:

де $\tau = rC$ або $\tau = \frac{L}{r}$ відповідно. На рис. 1.4.4 і 1.4.5 показано rC - і rL -кола другого порядку (що мають у своєму складі два реактивні елементи). Частотні характеристики цих більш складних кіл розраховуються методом контурних струмів або вузлових потенціалів. Для кіл, зображених на рис. 1.4.4, вони такі:

$$K_U(\omega) = \frac{(\omega\tau)^2}{\sqrt{1 + 7(\omega\tau)^2 + (\omega\tau)^4}};$$

$$\varphi(\omega) = \pi - \text{arctg} \frac{3\omega\tau}{1 - (\omega\tau)^2},$$

where $\tau = rC$ or $\tau = \frac{L}{r}$ respectively. For circuits in Fig. 1.4.5 they are:

де $\tau = rC$ або $\tau = \frac{L}{r}$ відповідно. Для кіл, зображених на рис. 1.4.5, вони такі:

$$K_U(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + 7(\omega\tau)^2 + (\omega\tau)^4}};$$

$$\varphi(\omega) = -\text{arctg} \frac{3\omega\tau}{1 - (\omega\tau)^2},$$

where $\tau = rC$ or $\tau = \frac{L}{r}$ respectively. Fig. 1.4.6 shows an rC -

де $\tau = rC$ або $\tau = \frac{L}{r}$ відповідно. На рис. 1.4.6 показано rC -коло

circuit of the third order having three reactive elements in its structure. The frequency characteristics are:

$$K_U(\omega) = \frac{|1 - (\omega\tau)^2|}{\sqrt{1 + 14(\omega\tau)^2 + (\omega\tau)^4}};$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{4\omega\tau}{1 - (\omega\tau)^2},$$

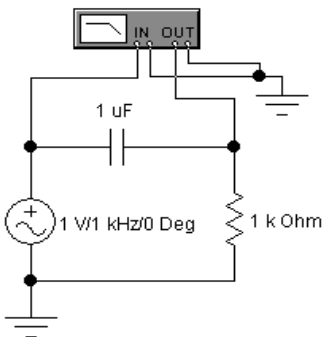
where $\tau = rC$.

The easiest way to measure the AFC and PhFC of the complex voltage transfer coefficient is measured by a special device – a frequency characteristic meter.

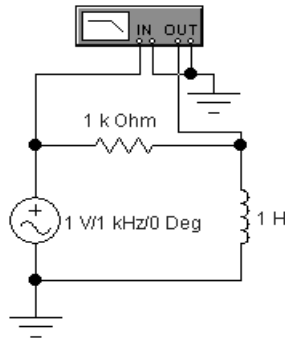
Working Procedure

1. Study an rC - and an rL AC circuits of the first order.

1.1. Set up a circuit according to Fig. 1.4.2 (a or b).



a



b

Fig. 1.4.2. Cr - and rL -circuits of the first order

Рис. 1.4.2. Cr - і rL -кола першого порядку

третього порядку (що має у своєму складі три реактивні елементи). Частотні характеристики такого кола:

де $\tau = rC$.

Найбільш просто АЧХ і ФЧХ комплексного коефіцієнта передачі за напругою вимірюються спеціальним приладом – вимірником частотних характеристик.

Порядок моделювання вимірювань та аналіз його результатів

1. Дослідити rC - і rL -коло змінного струму першого порядку.

1.1. Скласти коло згідно з рис. 1.4.2 (а або b).

1.2. Obtain the AFC and PhFC of the circuit under study. The measurements are to be made in the frequency range 1...10000 Hz. Enter the measured data to Table 1.4.1.

1.3. Calculate the AFC and PhFC of the circuit under study and enter their values to table. 1.4.1.

1.4. Compare the measured and calculated characteristics. Plot graphs of the AFC and PhFC. Determine the cut off frequency (the frequency at which the AFC is equal to 0.707). Make conclusions.

1.5. Construct the frequency locus of the investigated circuit.

1.6. Set up a circuit according to Fig. 1.4.3 (a or b).

1.7. Obtain the AFC and PhFC of the investigated circuit. The measurements are to be made in the frequency range 1...10000 Hz. Enter the measured data to Table 1.4.2.

1.2 Зняти АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола. Вимірювання виконати в діапазоні частот 1...10000 Гц. Виміряні дані занести до табл. 1.4.1.

1.3. Розрахувати АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола й занести їх значення до табл. 1.4.1.

1.4. Порівняти виміряні й розрахункові значення. Побудувати графіки АЧХ і ФЧХ. Визначити частоту зрізу (частоту, на якій величина АЧХ дорівнює 0,707). Зробити висновки.

1.5. Побудувати частотний годограф досліджуваного кола.

1.6. Скласти коло згідно з рис. 1.4.3 (а або b).

1.7. Зняти АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола. Вимірювання виконати в діапазоні частот 1...10000 Гц. Виміряні дані занести до табл. 1.4.2.

Table 1.4.1. Frequency characteristic of CR- or RL-circuit
Таблиця 1.4.1. Частотні характеристики CR- або RL-кола

f , Hz								
AFC _{mes}								
AFC _{calc}								
PhFC _{mes}								
PhFC _{calc}								

1.8. Calculate the AFC and PhFC of the circuit and enter their values to table. 1.4.2

1.8. Розрахувати АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола й занести їх значення до табл. 1.4.2.

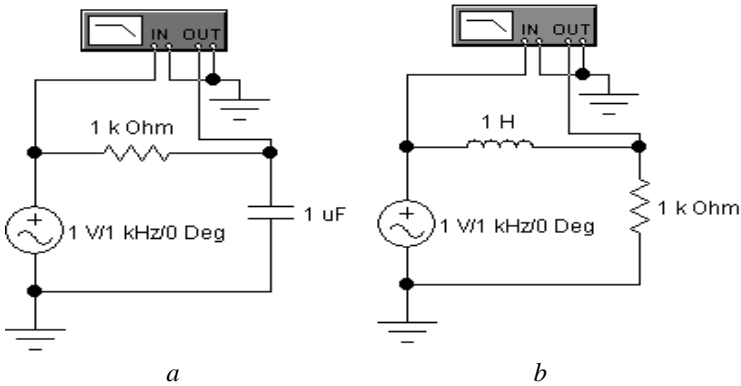


Fig. 1.4.3. rC - and Lr -circuits of the first order
 Рис. 1.4.3. rC - і Lr -кола першого порядку

1.9. Compare the measured and calculated characteristics. Plot AFC and PhFC graphs. Determine the cutoff frequency. Make conclusions.

1.10. Construct a frequency locus of the investigated circuit.

1.9. Порівняти величини вимірної й розрахункової характеристик. Побудувати графіки АЧХ і ФЧХ. Визначити частоту зрізу. Зробити висновки.

1.10. Побудувати частотний годограф досліджуваного кола.

Table 1.4.2. Frequency characteristic of RC- or LR-circuit
 Таблиця 1.4.2. Частотні характеристики RC- або LR-кола

f , Hz									
AFC _{mes}									
AFC _{calc}									
PhFC _{mes}									
PhFC _{calc}									

2. Study an rC - and an rL -AC circuits of the second order.

2.1. Set up a circuit according to Fig. 1.4.4 (*a* or *b*).

2.2. Obtain the AFC and PhFC of the investigated circuit. The measurements are to be made

2. Дослідити rC - і rL -коло змінного струму другого порядку.

2.1. Скласти коло згідно з рис. 1.4.4 (*a* або *b*).

2.2. Зняти АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола. Вимірювання провести в діапазоні час-

in the frequency range 1...10000 Hz. Enter the measured data to Table 1.4.3.

тот 1...10000 Гц. Виміряні дані занести до табл. 1.4.3.

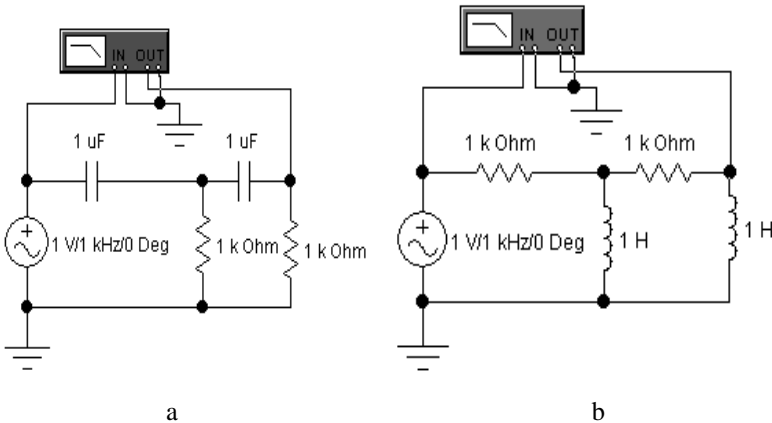


Fig. 1.4.4. Cr - and rL -circuits of the second order
Рис. 1.4.4. Cr - і rL -кола другого порядку

2.3. Calculate the AFC and PhFC of the circuit and enter their values to Table 1.4.3.

2.3. Розрахувати АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола й занести їх значення до табл. 1.4.3.

2.4. Compare the measured and calculated characteristics. Plot AFC and PhFC graphs. Determine the cut off frequency. Make conclusions.

2.4. Порівняти величини вимірної й розрахункової характеристик.

2.5. Construct a frequency locus of the investigated circuit.

Побудувати графіки АЧХ і ФЧХ. Визначити частоту зрізу. Зробити висновки.

2.5. Побудувати частотний годограф досліджуваного кола.

Table 1.4.3. Frequency characteristic of the second order CR- or RL-circuit
Таблиця 1.4.3. Частотні характеристики CR- або RL-кола другого порядку

f , Hz								
AFC _{mes}								
AFC _{calc}								
PhFC _{mes}								
PhFC _{calc}								

2.6. Set up a circuit according to Fig. 1.4.5 (a or b).

2.6. Скласти коло згідно з рис. 1.4.5 (а або b).

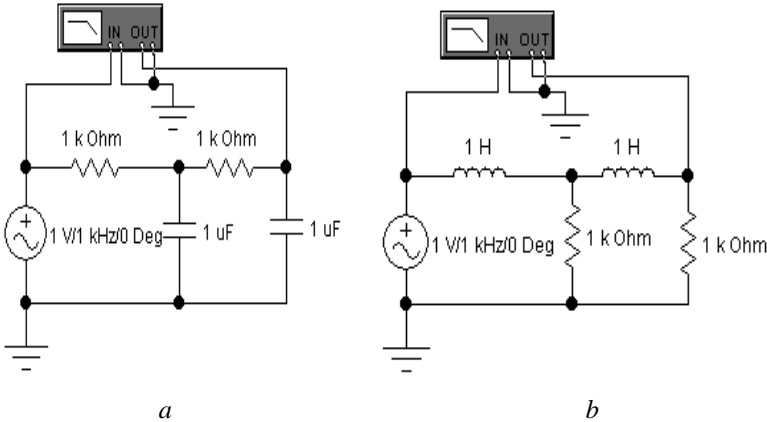


Fig. 1.4.5. rC - and Lr -circuits of the second order
Рис. 1.4.4. rC - і Lr -кола другого порядку

2.7. Obtain the AFC and PhFC of the circuit. The measurements are to be made in the frequency range 1 ... 10000 Hz. Enter the measured data to Table 1.4.4.

2.7. Зняти АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола. Вимірювання провести в діапазоні частот 1...10000 Гц. Виміряні дані занести до табл. 1.4.4.

2.8. Calculate the AFC and PhFC of the circuit and enter their values to Table 1.4.4.

2.8. Розрахувати АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола й занести їх значення до табл. 1.4.4.

Table 1.4.4. Frequency characteristic of the second order RC- or LR-circuit
Таблиця 1.4.4. Частотні характеристики RC- або LR-кола другого порядку

f , Hz							
AFC _{mes}							
AFC _{calc}							
PhFC _{mes}							
PhFC _{calc}							

2.9. Compare the measured and calculated characteristics. Plot AFC and PhFC graphs. De-

2.9. Порівняти величини виміряної й розрахункової характеристик.

termine the cutoff frequency. Make conclusions.

2.10. Construct a frequency locus of the investigated circuit.

3. Study an rC -AC circuit of the third order.

3.1. Set up a circuit according to Fig. 1.4.6.

Побудувати графіки АЧХ і ФЧХ. Визначити частоту зрізу. Зробити висновки.

2.10. Побудувати частотний годограф досліджуваного кола.

3. Дослідити rC -коло змінного струму третього порядку.

3.1. Скласти коло згідно з рис. 1.4.6.

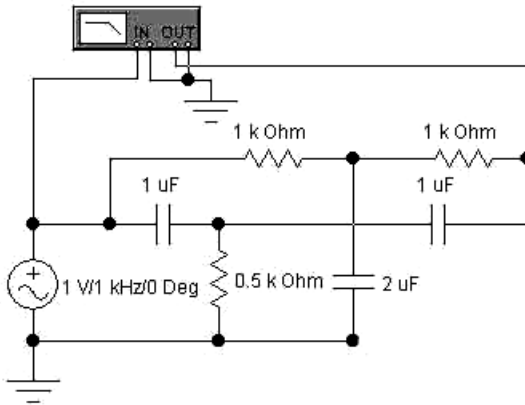


Fig. 1.4.6. rC -circuit of the third order
Рис. 1.4.4. rC -коло третього порядку

3.2. Obtain the AFC and PhFC of the circuit. The measurements are to be made in the frequency range 1 ... 10000 Hz. Enter the measured data to Table 1.4.5.

3.3. Calculate the AFC and PhFC of the circuit and enter their values to Table 1.4.5.

3.4. Compare the measured and calculated characteristics. Plot AFC and PFC graphs. Determine the cut off frequency. Make conclusions.

3.2. Зняти АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола. Вимірювання виконати в діапазоні частот 1...10000 Гц. Виміряні дані занести до табл. 1.4.5.

3.3. Розрахувати АЧХ і ФЧХ досліджуваного кола і занести його значення в табл. 1.4.5.

3.4. Порівняти величини вимірної й розрахункової характеристик.

Побудувати графіки АЧХ і ФЧХ. Визначити частоту зрізу. Зробити висновки.

3.5. Construct a frequency locus of the investigated circuit.

3.5. Побудувати частотний годограф досліджуваного кола.

Table 1.4.5 Frequency characteristic of the third order RC-circuit
Таблиця 1.4.5. Частотні характеристики RC-кола третього порядку

f , Hz								
AFC _{mes}								
AFC _{calc}								
PhFC _{mes}								
PhFC _{calc}								

4. Make an experimentation paper containing the results of the study and your conclusions.

4. Підготувати звіт з результатами проведених досліджень і висновками.

Laboratory work 5

SINGLE AND COUPLED OSCILLATORY CIRCUITS

(Estimated time:
4 hours)

Aim of the work. Studying the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of series and parallel rCL -oscillatory circuits by means of modeling in the *Electronic Workbench* environment. Plotting amplitude-frequency and phase-frequency characteristics and a frequency locus for the investigated circuits.

To be well prepared for this laboratory work, a student should study the present description as well as appropriate units of the recommended literature, and be able to answer test questions.

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДИНОЧНИХ І ЗВ'ЯЗАНИХ КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ

(Рекомендований обсяг занять:
4 год)

Мета роботи. Вивчити АЧХ і ФЧХ послідовних і паралельного коливальних rLC -контурів за допомогою моделювання в середовищі програми *Electronics Workbench*. Побудувати графіки АЧХ, ФЧХ і частотний годограф для досліджених кіл.

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно вивчити відповідний матеріал за рекомендованою літературою, а також уміти відповідати на контрольні запитання.

Test questions

1. What are serial and parallel oscillatory circuits? Why are these circuits called so?
2. What parametres of oscillatory circuits are called primary and which of them are called secondary?
3. What is current resonance and voltage resonance in oscillatory circuits?
4. What kinds of complex frequency functions are used to describe processes in series oscillatory circuits?
5. What kinds of complex frequency functions are used to describe processes in parallel oscillatory circuits?
6. How frequency-selective properties of oscillatory circuits are estimated?
7. How are frequency characteristics of a series oscillatory circuit measured?
8. How are frequency characteristics of a parallel oscillatory circuit measured?
9. What are coupled oscillatory circuits?
10. What parameters characterise the coupling of oscillatory circuits?

Brief theoretical information

1. A **series oscillatory circuit** is an electric circuit containing an inductor, a capacitor and a resistor connected in series with a voltage source (Fig. 1.5.1). The parametres of the inductor L , capacitor C and

Контрольні запитання

1. Що таке послідовний і паралельний коливальні контури? Чому ці кола отримали таку назву?
2. Які параметри коливальних контурів називаються первинними і які вторинними?
3. Що таке резонанс струмів і резонанс напруг у коливальних контурах?
4. Які різновиди комплексних функцій використовуються для опису процесів у послідовному коливальному контурі?
5. Які різновиди комплексних функцій використовуються для опису процесів у паралельному коливальному контурі?
6. Як оцінюються частотно-вибіркові властивості коливальних контурів?
7. Як вимірюються частотні характеристики послідовного коливального контуру?
8. Як вимірюються частотні характеристики паралельного коливального контуру?
9. Що таке зв'язані коливальні контури?
10. Якими величинами характеризується зв'язок коливальних контурів?

Основні теоретичні відомості

1. **Послідовний коливальний контур** являє собою електричне коло, що містить індуктивну котушку, конденсатор і опір, увімкнені послідовно із джерелом напруги (рис. 1.5.1). Параметри котушки L , кон-

resistor r are called primary parameters of the circuit.

An analysis of processes proceeding in the circuit shows that at the frequency of the oscillator

денсатора C і опору r називаються первинними параметрами контуру.

Аналіз процесів, що перебігають у контурі, показує, що за частоти генератора

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1.5.1)$$

that is called resonant, a voltage resonance appears. This phenomenon is followed by the appearance of voltages across its reactive elements Q times exceeding the EMF of the source.

The value Q is called quality factor (Q -factor) and is connected with the primary parameters of a circuit by the relationship

що називають резонансною, в такому колі виникає резонанс напруг – явище, яке супроводжується появою на його реактивних елементах напруг, які перевищують ЕРС джерела в Q разів.

Величина Q називається добротністю й пов'язана з первинними параметрами контуру співвідношенням

$$Q = \frac{\rho}{r}, \quad (1.5.2)$$

where magnitude

де величина

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

is called wave resistance, and the value inversed to Q -factor

називається хвильовим опором, а величина, обернена добротності

$$d = \frac{1}{Q},$$

is called circuit attenuation.

називається загасанням контуру.

Dependence of the current amplitude I_m on frequency is expressed by the relationship

Залежність амплітуди струму I_m від частоти виражається співвідношенням

$$I_m = \frac{I_{m0}}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}, \quad (1.5.3)$$

where $I_{m0} = \frac{E_m}{r}$ – resonance current amplitude, E_m – amplitude of the oscillator's signal source.

Dependence of the current phase on frequency is defined by the relationship

$$\varphi(\omega) = \arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right). \quad (1.5.4)$$

Frequency-selective properties of an oscillatory circuit are quantitatively estimated by the band width:

$$\Pi = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q},$$

where f_1 and f_2 are frequencies at which the amplitude of a current decreases to 0.707 of its maximum value.

The parameters f_0 , Q , ρ , Π , f_1 and f_2 are referred to as secondary parameters of a circuit.

Dependence of the amplitude of voltage across the capacitor on frequency is defined by the relationship

$$U_{m,C} = \frac{QE_m \frac{\omega_0}{\omega}}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}.$$

де $I_{m0} = \frac{E_m}{r}$ – амплітуда струму під час резонансу, E_m – амплітуда сигналу генератора.

Залежність фази струму від частоти задається співвідношенням

Частотно-вибірні властивості коливального контуру кількісно оцінюється смугою пропускання:

де f_1 і f_2 – це частоти, на яких амплітуда струму знижується до рівня 0,707 від свого максимального значення.

Параметри f_0 , Q , ρ , Π , f_1 і f_2 називають вторинними параметрами контуру.

Залежність амплітуди напруги на конденсаторі від частоти задається співвідношенням

Dependence of the amplitude of voltage across the inductor on frequency is defined by the relationship

$$U_{m,L} = \frac{QE_m \frac{\omega}{\omega_0}}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}.$$

Since Q is usually much greater than 1, a series oscillatory circuit is used to amplify the EMF of the input signal source.

2. A parallel oscillatory circuit is an electric circuit containing an inductor, a capacitor and a voltage source with a certain inner resistance, all connected in parallel (Fig. 1.5.2).

At a certain frequency f_{RES} , referred to as resonant, the susceptances of the branches of a circuit compensate each other, and in such a circuit appears a current resonance – a phenomenon in which currents in its reactive elements Q times exceed the current consumed by the circuit from the voltage source.

The resonant frequency is close to f_0 defined by relationship (1.5.1), and Q is defined by relationship (1.5.2).

Залежність амплітуди напруги на індуктивності від частоти задається співвідношенням

Оскільки зазвичай Q набагато більша від одиниці, то послідовний коливальний контур використовується як підсилювач ЕРС джерела вхідного сигналу.

2. Паралельний коливальний контур являє собою електричне коло, що містить паралельно з'єднані індуктивну котушку, конденсатор і джерело напруги з деяким внутрішнім опором (рис. 1.5.2).

На деякій частоті $f_{рез}$, що називають резонансною, реактивні провідності гілок контуру взаємно компенсуються і в такому колі виникає резонанс струмів – явище, за якого струми в її реактивних елементах в Q разів перевищують струм, що споживається контуром від джерела напруги.

Резонансна частота близька до величини f_0 , що визначається співвідношенням (1.5.1), а величина Q визначається співвідношенням (1.5.2).

The amplitude-frequency characteristic of current in an unbranched part of a circuit is defined by the relationship

$$I_m = I_{m0} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}, \quad (1.5.5)$$

where $I_{m0} = \frac{E_m}{Q^2(r_1 + r_2)}$ – resonance amplitude of a current; E_m — amplitude of the oscillator's signal.

The phase of current in an unbranched part of a circuit is defined by the relationship

$$\varphi(\omega) = -\arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right). \quad (1.5.6)$$

3. Coupled oscillatory circuits with capacitive coupling.

Oscillatory circuits are called coupled if processes proceeding in them influence one another. A circuit to which the signal source is connected is called primary. A circuit from which the output signal (for example, current) is taken is called secondary.

Primary and secondary circuits are coupled by a coupling element. In Fig. 1.5.3 two circuits coupled by a capacitive coupling element C_{coup} are shown. The output current in the second circuit depends on the value of coupling reactivity X_{coup} . The maximum current in

Амплітудно-частотна характеристика струму в нерозгалуженій частині кола визначається співвідношенням

де $I_{m0} = \frac{E_m}{Q^2(r_1 + r_2)}$ – амплітуда струму при резонансі; E_m – амплітуда сигналу генератора.

Фаза струму в нерозгалуженій частині кола визначається співвідношенням

3. Зв'язані коливальні контури з ємнісним зв'язком.

Коливальні контури називаються зв'язаними, якщо процеси, що перебігають у них, впливають один на одного. Контур, до якого підключається джерело сигналу, називається первинним. Контур, з якого знімається вихідний сигнал, називається вторинним.

Первинні й вторинні контури зв'язані елементом зв'язку. На рис. 1.5.3 показано два контури, зв'язані ємнісним елементом зв'язку $C_{\text{зв}}$. Вихідний струм у другому контурі залежить від величини реактивності зв'язку $X_{\text{зв}}$. Максимальний

the secondary circuit is attained in case of complete resonance at optimal coupling

струм у вторинному контурі досягається у випадку повного резонансу за оптимального зв'язку

$$X_{\text{coup.opt}} = \sqrt{r_1 r_2}, \quad (1.5.7)$$

i.e. when coupling capacitance is

тобто за ємності зв'язку

$$C_{\text{coup.opt}} = \frac{1}{\omega X_{\text{coup}}}, \quad (1.5.8)$$

where r_1 and r_2 – active resistances in the primary and secondary circuits.

де r_1 і r_2 – активні опори в первинному й вторинному контурах.

In this case the maximum current in the secondary circuit

При цьому максимальний струм у вторинному контурі

$$I_{m2,\text{max}} = \frac{E_{m1}}{2\sqrt{r_1 r_2}}, \quad (1.5.9)$$

and the amplitude-frequency characteristic of transfer conductivity $Y_{21}(\omega_0)$ at the resonant frequency

а АЧХ передатної провідності $Y_{21}(\omega_0)$ на резонансній частоті

$$Y_{21}(\omega_0) = \frac{I_{m2}}{E_{m1}} = \frac{1}{2\sqrt{r_1 r_2}}. \quad (1.5.10)$$

Working Procedure

Порядок моделювання вимірювань та аналіз його результатів

1. Study the frequency characteristics of a *series oscillatory circuit*.

1. Дослідити частотні характеристики послідовного коливального контуру.

1.1. Set up a circuit according to Fig. 1.5.1.

1.1. Скласти коло згідно з рис. 1.5.1.

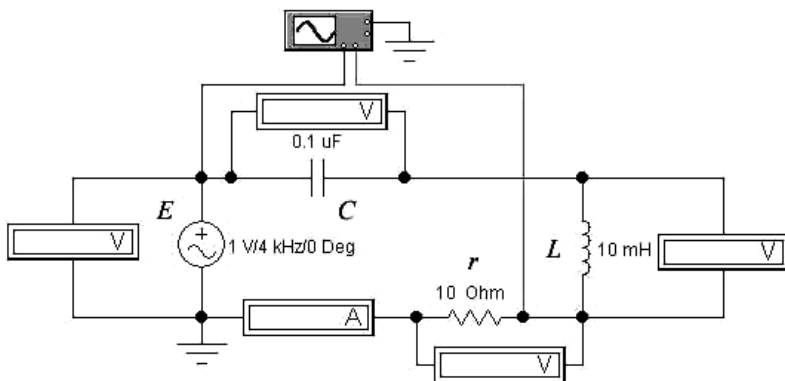


Fig. 1.5.1. Series oscillatory circuit

Рис. 1.5.1. Послідовний коливальний контур

1.2. Measure the values of voltage drop on the capacitor, inductor and resistor as well as the value of current in the circuit and the phase shift between the signal of the oscillator and the current in the circuit. The measurements are to be made in the frequencies range 4...6 kHz. Enter the measured data to Table 1.5.1.

1.2. Виміряти величини падіння напруги на ємності, індуктивності й опорі, а також величину струму в колі та зсув фаз між сигналом генератора і струмом у колі. Вимірювання виконати в діапазоні частот 4...6 кГц. Виміряні дані занести до табл. 1.5.1.

Table 1.5.1. Data for analyzing series oscillatory circuit

Таблиця 1.5.1. Дані аналізу послідовного коливального контуру

f , Hz							
U_R , V							
U_C , V							
U_L , V							
I , mA							
φ , deg.							

1.3. Use the measurement results to plot the amplitude-

1.3. За результатами вимірювань побудувати АЧХ падінь

frequency characteristic of voltage drops on the circuit elements. Analyze and determine the secondary parameters of the circuit: resonant frequency, band width, Q -factor, wave impedance. Enter the values of the secondary parameters to Table 1.5.2.

1.4. Use the primary parameters of the circuit to calculate its secondary parameters that are to be entered to Table 1.5.2. Compare the calculated and measured values. Make conclusions.

напруги на елементах контуру, проаналізувати й визначити вторинні параметри контуру: резонансну частоту, смугу пропускання, добротність, хвильовий опір. Величини вторинних параметрів занести до табл. 1.5.2.

1.4. Знаючи первинні параметри контуру, розрахувати вторинні й занести їх до табл. 1.5.2. Порівняти розрахункові й виміряні значення. Зробити висновки.

Table 1.5.2. Secondary parameters of series oscillatory circuit

Таблиця 1.5.2. Вторинні параметри послідовного коливального контуру

Parameters	f_{RES} , kHz	B , kHz	Q	ρ , Ohm
Measurement				
Calculation				

1.5. Build the normalized measured amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of the current in the investigated circuit.

1.6. Calculate the normalized amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of the current in the investigated circuit according to equations (1.5.3) and (1.5.4) and draw the calculated graphs and the measured ones on the same page.

1.7. Compare the measured and calculated characteristics. Make conclusions.

1.5. Побудувати нормовану виміряну АЧХ і ФЧХ струму в досліджуваному колі.

1.6. Розрахувати нормовану АЧХ і ФЧХ струму в досліджуваному колі за формулами (1.5.3) та (1.5.4) і побудувати розрахункові графіки на одному аркуші з виміряними.

1.7. Порівняти виміряну й розрахункову характеристики. Зробити висновки.

2. Study the frequency characteristics of a parallel oscillatory circuit.

2.1. Set up a circuit according to Fig. 1.5.2.

2. Дослідити частотні характеристики паралельного коливального контуру.

2.1. Скласти коло згідно з рис. 1.5.2.

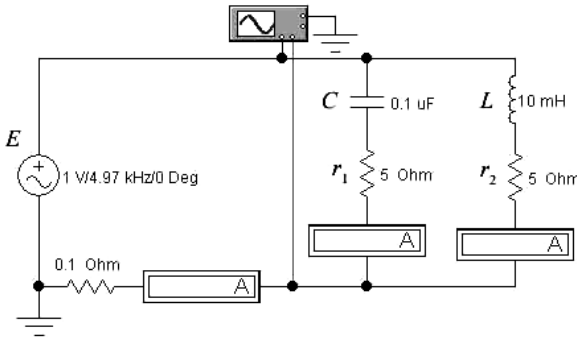


Fig. 1.5.2. Parallel oscillatory circuit
Рис. 1.5.2. Паралельний коливальний контур

2.2. Measure the values of current through the capacitor, inductor and the unbranched part of the circuit as well as the phase shift between the signal of the voltage source and the current in the unbranched part of the circuit. The measurements are to be made in the frequency range 4...6 kHz. Enter the measured data to Table 1.5.3.

2.2. Виміряти величини струмів через ємність, індуктивність і нерозгалужену гілку кола, а також зсув фаз між сигналом генератора й струмом у нерозгалуженій гілці кола. Вимірювання виконати в діапазоні частот 4...6 кГц. Виміряні дані занести до табл. 1.5.3.

Table 1.5.3. Data for analyzing parallel oscillatory circuit
Таблиця 1.5.3. Дані аналізу паралельного коливального контуру

f , Hz							
I_C , mA							
I_L , mA							
I , mA							
U_K , V							
φ , deg.							

2.3. Use the measurement results to build the amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of the current in the unbranched part of the circuit, analyze and determine the secondary parameters of the circuit: resonant frequency, band width, Q -factor, wave impedance. Enter the values of secondary parameters to Table 1.5.4.

2.3. За результатами вимірювань побудувати АЧХ і ФЧХ струму в нерозгалуженій гілці кола, проаналізувати й визначити вторинні параметри контуру: резонансну частоту, смугу пропускання, добротність, хвильовий опір. Величини вторинних параметрів занести до табл. 1.5.4.

Table 1.5.4. Secondary parameters of parallel oscillatory circuit

Таблиця 1.5.4. Вторинні параметри паралельного коливального контуру

Parameters	f_{res} , kHz	B, kHz	Q	ρ , Ohm
Measurement				
Calculating				

2.4. Use the primary parameters of the circuit to calculate its secondary parameters that are to be entered to Table 1.5.4. Compare the calculated and measured values. Make conclusions.

2.4. Знаючи первинні параметри контуру, розрахувати вторинні й занести їх до табл. 1.5.4. Порівняти розрахункові й виміряні значення. Зробити висновки.

2.5. Calculate the amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of the current in the unbranched part of the circuit according to equations (1.5.5) and (1.5.6) and draw the calculated graphs and the measured ones on the same page.

2.5. Розрахувати АЧХ і ФЧХ струму в нерозгалуженій гілці кола відповідно до співвідношень (1.5.5) і (1.5.6) та побудувати розрахункові графіки на одному аркуші з виміряними.

2.6. Build the amplitude-frequency characteristic of currents in the investigated circuit. Compare the frequency characteristics of currents in different branches of the investigated circuit. Make conclusions.

2.6. Побудувати АЧХ струмів у досліджуваному колі. Порівняти частотні характеристики струмів у різних гілках досліджуваного кола. Зробити висновки.

3. Study the frequency characteristics of coupled oscillatory circuits.

3.1. Set up a circuit according to Fig. 1.5.3.

3. Дослідити частотні характеристики зв'язаних коливальних контурів.

3.1. Скласти схему згідно з рис. 1.5.3.

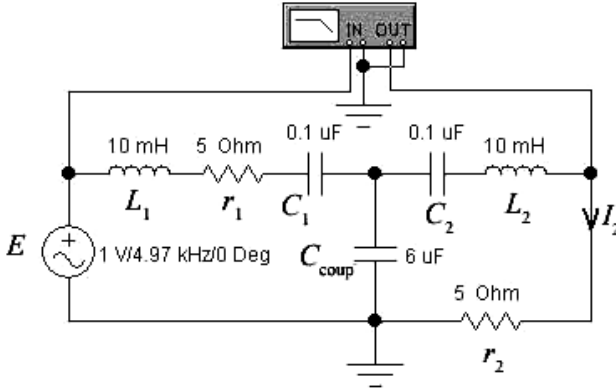


Fig. 1.5.3. Coupled oscillatory circuit
Рис. 1.5.3. Зв'язний коливальний контур

3.2. Setting the parameter C_{coup} according to Table 1.5.5, measure the amplitude-frequency characteristic of transfer conductance $Y_{21}(\omega)$ of a system of coupled circuits in the frequency band 4...6 kHz. Enter the measured data to Table 1.5.5. (note: it is not the current in the second circuit that the amplitude-frequency characteristic meter in Fig. 1.5.3 measures directly, but the voltage drop on r_2 created by this current, i.e. a value that is 5 times greater than the amplitude-frequency characteristic of transfer conductance $Y_{21}(\omega)$).

3.3. Build to scale all the measured amplitude-frequency characteris-

3.2. Установлюючи параметр $C_{\text{зв}}$ згідно з табл. 1.5.5, виміряти АЧХ передатної провідності $Y_{21}(\omega)$ системи зв'язаних контурів у смузі частот 4...6 кГц. Виміряні дані занести до табл. 1.5.5. (Звернути увагу: вимірник АЧХ на рис. 1.5.3 безпосередньо вимірює не струм у другому контурі, а падіння напруги на r_2 , створюване цим струмом, тобто величину в 5 разів більшу, ніж АЧХ передатної провідності $Y_{21}(\omega)$).

3.3. На одному аркуші в масштабі побудувати всі виміряні

tics of transfer conductance $Y_{21}(\omega)$ on АЧХ передатної провідності the same page. $Y_{21}(\omega)$.

Table 1.5.5. Frequency characteristics of coupled oscillatory circuit

Таблиця 1.5.5. Частотні характеристики зв'язного коливального контуру

C_{coup} μF	Π , kHz	f , kHz	4,0															6,0
2,5		AFC																
4		AFC																
6		AFC																
8		AFC																

3.4. Using the graphs of amplitude-frequency characteristics, measure the band width B of the system of coupled circuits for all variants of the coupling parameter C_{coup} . Enter the measured data to Table 1.5.5. Build a plot of C_{coup} dependence of B .

3.5. Using the graphs of the amplitude-frequency characteristic of transfer conductance, measure the parameters of optimal coupling: $C_{\text{coup,opt}}$, $X_{\text{coup,opt}}$ and the maximum value of the amplitude-frequency characteristic of transfer conductance. Enter the measured data to Table 1.5.6.

3.6. Calculate the parameters of optimal coupling: $C_{\text{coup,opt}}$, $X_{\text{coup,opt}}$ and the maximum magnitude of the amplitude-frequency characteristic of cur-

3.4. За допомогою графіків АЧХ виміряти смугу пропускання B системи зв'язаних контурів для всіх варіантів параметра зв'язку $C_{\text{зв}}$. Виміряні дані занести до табл. 1.5.5. Побудувати графік залежності Π від $C_{\text{зв}}$.

3.5. За допомогою графіків АЧХ передатної провідності виміряти параметри оптимального зв'язку: $C_{\text{зв,опт}}$, $X_{\text{зв,опт}}$ і максимальну величину АЧХ передатної провідності. Виміряні дані занести до табл. 1.5.6.

3.6. Розрахувати параметри оптимального зв'язку: $C_{\text{зв,опт}}$, $X_{\text{зв,опт}}$ і максимальну величину АЧХ струму в другому контурі згідно з формулами (1.5.7) –

rent in the second circuit according to equations (1.5.7) – (1.5.10). Enter the calculated data to Table 1.5.6.

Table 1.5.6. Parameters of optimal coupling of coupled oscillatory circuit
Таблиця 1.5.6. Параметри оптимального зв'язку зв'язного коливального контуру

$C_{\text{coup.opt.}}$ MEASURED	$X_{\text{coup.opt.}}$ MEASURED	$AFC_{\text{max.}}$ MEASURED	$C_{\text{coup.opt.}}$ MEASURED	$X_{\text{coup.opt.}}$ MEASURED	$AFC_{\text{MAX.}}$ MEASURED

3.7 Compare the calculated and measured data. Make conclusions.

4. Make an experimentation paper containing the results of the study and your conclusions.

Laboratory work 6
TRANSIENT PROCESSES
IN FIRST-ORDER
CIRCUITS

(Estimated time:
 2 hours)

Aim of the work. Studying the time characteristics of transient processes in RC - circuits of the first order powered by a direct and a harmonic voltages by means of modelling in the Electronics Workbench program environment. Plot a graph of time dependence of current in the circuit and voltage across the elements for the investigated circuits.

3.7. Порівняти розрахункові дані з вимірними. Зробити висновки.

4. Підготувати звіт з результатами проведених досліджень і висновками.

Лабораторна робота 6
ДОСЛІДЖЕННЯ
ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ
У КОЛАХ ПЕРШОГО
ПОРЯДКУ

(Рекомендований обсяг занять:
 2 год)

Мета роботи. Вивчити часові характеристики перехідних процесів у RC -колах першого порядку в разі ввімкнення їх на постійну й гармонічну напруги за допомогою моделювання в середовищі програми Electronics Workbench. Побудувати графіки часової залежності струму й напруги на елементах для досліджуваних кіл.

To be well prepared for this laboratory work, a student should study the present description as well as appropriate units of the recommended literature, and be able to answer the following test questions.

Test questions

1. What is a transient process?
2. What are transient processes caused by?
3. State the first law of commutation. What does its physics consist in?
4. State the second law of commutation. What does its physics consist in?
5. What are initial conditions? Name their kinds.
6. State a general approach to calculation of transient processes.
7. What methods of solving differential equations do you know?
8. What is an RC - circuit of the first order? What is the circuit time constant?

Brief theoretical information

In electric circuits the following operating conditions are distinguished:

- 1) steady-state – if the currents and voltage do not change with time or change periodically;
- 2) transient – during transition from one steady-state condition to another.

A transient process occurs as a result of commutations – stepwise changes of the parameters, circuit

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно вивчити відповідний матеріал за рекомендованою літературою, а також уміти відповідати на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Що таке перехідний процес?
2. У чому причина виникнення перехідних процесів?
3. Сформулюйте перший закон комутації. У чому його фізична сутність?
4. Сформулюйте другий закон комутації. У чому його фізична сутність?
5. Що таке початкові умови? Назвіть види початкових умов.
6. Сформулюйте загальний підхід до розрахунку перехідних процесів.
7. Які способи розв'язання диференціальних рівнянь ви знаєте?
8. Що таке RC -коло першого порядку? Що таке стала часу кола?

Основні теоретичні відомості

В електричних колах розрізняють режими:

- 1) усталений, якщо струми й напруги не змінюються в часі або змінюються періодично;
- 2) перехідний – у разі переходу від одного усталеного режиму до іншого.

Перехідний процес виникає в результаті комутацій – стрибкоподібних змін параметрів,

structure, or input actions. The commutations are considered to be instantaneous, and a transient process process is infinitely long.

Transient processes in circuits with reactive parameters (inductance L , capacitance C) occur as the energy accumulated in them cannot change instantly:

$$W_L = \frac{Li^2}{2}; \quad W_C = \frac{Cu^2}{2}, \quad (1.6.1)$$

which otherwise corresponds to an infinite power.

As such commutations take place instantly, the energy in the reactive elements (1.6.1) does not change at the moment of commutation. It is described in commutation laws:

1. The first law of commutation states that the current in an inductor cannot change instantly:

$$i_L(0_-) = i_L(0) = i_L(0_+). \quad (1.6.2)$$

2. The second law of commutation states that the voltage across a capacitor cannot change instantly:

$$u_C(0_-) = u_C(0) = u_C(0_+). \quad (1.6.3)$$

In (1.6.2) and (1.6.3) $t = (0_-)$ – a point in time right before commutation; $t = (0_+)$ – after commutation, $t = (0)$ is the moment of commutation.

структури кола або вхідних впливів. Вважають, що комутації відбуваються миттєво, а перехідний процес триває нескінченно довго.

Виникнення перехідних процесів у колах з реактивними параметрами (індуктивністю L , ємністю C) пояснюються неможливістю миттєвої зміни нагромадженої в них енергії:

що в протилежному випадку відповідає нескінченній потужності.

Оскільки комутація відбувається миттєво, то в момент комутації енергія в реактивних елементах (1.6.1) не змінюється. Це відображено в законах комутації:

1. Перший закон комутації: струм в індуктивності миттєво змінюватися не може:

2. Другий закон комутації: напруга на ємності миттєво змінюватися не може:

У рівняннях (1.6.2) і (1.6.3) $t = (0_-)$ – це момент часу, безпосередньо перед комутацією; $t = (0_+)$ – після комутації, $t = (0)$ – це момент комутації.

The values of currents and voltages at the moment $t=(0_-)$ are called initial conditions. The initial conditions can be dependent and independent, zero and non-zero.

Dependent initial conditions are currents and voltages that change at the moment of commutation, for example, the voltage across an inductor, the current in a capacitor. Independent initial conditions are currents and voltages that do not change at the moment of commutation, for example, the current in an inductor, the voltage across a capacitor.

If currents and voltages at the moment of commutation are equal to zero, they are called zero initial conditions; if they are not equal to zero – non-zero initial conditions.

The general approach to the analysis of transient processes is that voltage and currents in a post-commutation circuit are calculated for points $t > 0$ under the initial conditions defined by the laws of commutation.

For example, for an RC -circuit connected to a direct voltage source (Fig. 1.6.1), when closing the switch at the point $t=0$, we get a closed loop (circuit) for which according to Kirchhoff's law for voltage

Значення струмів і напруг у момент $t=(0_-)$ називають початковими умовами. Початкові умови бувають залежними й незалежними, нульовими й ненульовими.

Залежні початкові умови – це струми й напруги, які змінюються в момент комутації, наприклад, напруга на індуктивності, струм через ємність. Незалежні початкові умови – це струми й напруги, які не змінюються в момент комутації, наприклад, струм в індуктивності, напруга на ємності.

Якщо струми й напруги в момент комутації дорівнюють нулю, то вони називаються нульовими початковими умовами, якщо ж вони не дорівнюють нулю – ненульовими початковими умовами.

Загальний підхід до аналізу перехідних процесів полягає в тому, що виконується розрахунок напруг і струмів у післякомутаційному колі для моментів часу $t > 0$ за початкових умов, обумовлених законами комутації.

Наприклад, при підключенні RC -кола до джерела постійної напруги (рис. 1.6.1) у разі замикання ключа в момент часу $t=0$ отримуємо замкнений контур, для якого відповідно до закону Кірхгофа для напруг

$$Ri + u_C - E = 0.$$

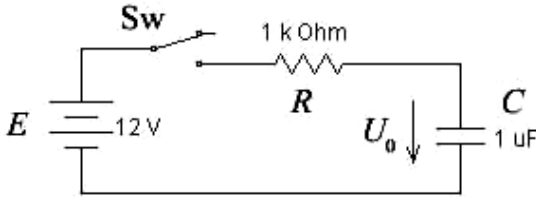


Fig. 1.6.1. RC- circuit connection to the direct voltage source

Рис. 1.6.1. Підключення RC-кола до джерела постійної напруги

As

Оскільки

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \quad (1.6.4)$$

the processes in a circuit for $t > 0$ are described by the equation

то процеси в колі при $t > 0$ описуються рівнянням

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E \quad (1.6.5)$$

under the initial conditions

за початкових умов

$$u_C(t=0) = U_0. \quad (1.6.6)$$

The solution of equation (1.6.5) and (1.6.6) gives a dependence of voltage across the capacitor on time:

Розв'язання рівнянь (1.6.5) і (1.6.6) дає залежність напруги на конденсаторі від часу:

$$u_C = (U_0 - E)e^{-\frac{t}{\tau}} + E \quad (1.6.7)$$

and the value of current through the capacitor (according to (1.6.4)):

і величину струму через конденсатор (згідно з рівнянням (1.6.4)):

$$i_C = (E - U_0)e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.6.8)$$

The described approach, being applied to the analysis of a tran-

Описаний підхід, застосований до аналізу перехідного

sient process occurring during connection of an RC -circuit to a source of harmonious voltage процесу, що виникає під час підключення RC -кола до джерела гармонічної напруги

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi),$$

allows us to get the following time-dependence of voltage in the capacitor and current through it: дозволяє отримати такі залежності напруги на конденсаторі та струму через нього від часу:

$$u_C = [U_0 - \frac{E_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\varphi - \arctg\omega\tau)] e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t + \varphi - \arctg\omega\tau), \quad (1.6.9)$$

$$i_C = -\frac{1}{R} [U_0 - \frac{E_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\varphi - \arctg\omega\tau)] e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\omega C E_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \cos(\omega t + \varphi - \arctg\omega\tau), \quad (1.6.10)$$

where $\tau = RC$ – circuit time constant. де $\tau = RC$ – стала часу кола.

With certain parameters of the circuit expressions (1.6.9) and (1.6.10) are simplified: За певних параметрів кола вирази (1.6.9) і (1.6.10) спрощуються:

1. $U_0 = 0$; $\varphi = \arctg\omega\tau$

$$u_C = \frac{E_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t); \quad (1.6.11)$$

$$i_C = \frac{\omega C E_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \cos(\omega t). \quad (1.6.12)$$

2. $U_0 = 0$; $\varphi = \pi/2 + \arctg\omega\tau$

$$u_C = -\frac{E_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \cos(\omega t); \quad (1.6.13)$$

$$i_C = \frac{\frac{E_m}{R}}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{\omega CE_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t). \quad (1.6.14)$$

3. $U_0 \neq 0$; $\varphi = \arctg \omega\tau$

$$u_C = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t); \quad (1.6.15)$$

$$i_C = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\omega CE_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \cos(\omega t). \quad (1.6.16)$$

The measuring circuit

The measuring circuit is shown in Fig. 1.6.2. Here the RC -circuit of the first order is connected to the direct (E_1) or alternating (E_2) voltage source by means of the switch Sw 3. The moments of switching on t_3 and switching off t_4 are provided by the options of Sw 3 and are set $t_3 = 1$ ms, $t_4 = 40$ ms.

The kind of source (E_1 or E_2) is installed by the switch Sw 1. The capacitor is previously charged by the source E_3 which is connected to the capacitor at a moment t_1 and disconnected at a moment t_2 .

The moments of connection t_1 and disconnection t_2 are provided by the options of Sw 2 and are set $t_1 = 0$ ms, $t_2 = 0,9$ ms. The para-

Опис вимірювальної схеми

Вимірювальну схему показано на рис. 1.6.2. У ній RC -коло першого порядку за допомогою ключа Кл.3 підключається до джерела постійної (E_1) або змінної (E_2) напруги. Моменти підключення t_3 і вимкнення t_4 Кл.3 задаються його опціями й установлюються $t_3 = 1$ мс, $t_4 = 40$ мс.

Вид джерела (E_1 або E_2) установлюється ключем Кл.1. Попередній заряд конденсатора здійснюється джерелом E_3 , що підключається до конденсатора в момент часу t_1 і вимикається в момент часу t_2 .

Моменти підключення t_1 і вимкнення t_2 Кл.2 задаються його опціями й установлюються $t_1 = 0$ мс, $t_2 = 0,9$ мс. Пара-

metres of the voltage sources are set by their options.

The current is measured as a voltage drop across the resistor $r=1\text{ Ohm}$, i.e. of a voltage drop of 1 mV corresponds to a current of 1 mA .

метри джерел напруги встановлюються їх опціями.

Струм виміряється величиною падіння напруги на резисторі $r=1\text{ Ом}$, тобто 1 мВ падіння напруги відповідає струму 1 mA .

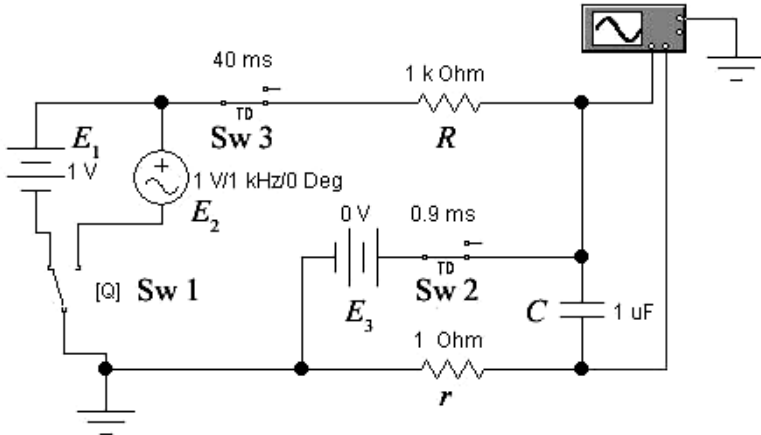


Fig. 1.6.2. The measuring circuit
Рис. 1.6.2. Вимірювальна схема

Working Procedure

1. Study the processes in an RC -circuit connected to a direct voltage source.

1.1. Set up a circuit in accordance with Fig. 1.6.2. Set the parameters of switches Sw 2 and Sw 3 in accordance with the metering circuit Description. Connect the circuit to the direct voltage source E_1 with the switch Sw 1.

Порядок моделювання вимірювань та аналіз його результатів

1. Вивчити процеси в RC -колі при ввімкненні його на постійну напругу.

1.1. Скласти схему згідно з рис. 1.6.2. Установити параметри ключів Кл.2 і Кл.3 відповідно до опису вимірювальної схеми. Ключем Кл.1 підключити до схеми джерело постійної напруги E_1 .

1.2. Make the following modeling. On the oscilloscope, display the oscillogram of current in the circuit and that of voltage across the capacitor in the time range 0...5 ms. Measure the time-dependence of the current and that of the voltage with a step of 0,1 ms. Enter the measured data to Table 1.6.1

1.3. Calculate the time-dependence of the current and that of the voltage in accordance with relationship (1.6.7) and (1.6.8).

1.4. Draw to scale the calculated and experimental time-dependences of the current and those of the voltage. Compare them and make conclusions.

1.5. Change the value of R to 0,5 kOhm and repeat the steps according to 1.2–1.4. Enter the obtained data to Table 1.6.2.

1.6. Set $E_3 = 2$ V and repeat the steps according to 1.2–1.5. Enter the obtained data to Tables 1.6.3 and 1.6.4.

1.7. Set $E_3 = -2$ V and repeat the steps according to 1.2–1.5. Enter the obtained data to tables 1.6.5 and 1.6.6.

1.2. Провести моделювання. Вивести на екран осцилографа епюру струму в колі й напруги на конденсаторі в часовому діапазоні 0...5 мс. Виміряти часові залежності струму й напруги із кроком 0,1 мс. Результати вимірювань занести до табл. 1.6.1.

1.3. Розрахувати часові залежності струму й напруги відповідно до співвідношень (1.6.7) і (1.6.8).

1.4. Зобразити у вигляді графіків розрахункові й експериментальні залежності струму й напруги від часу. Порівняти їх, зробити висновки.

1.5. Змінити величину параметра R на 0,5 кОм і повторити дії згідно з п.п. 1.2–1.4. Результати вимірювань занести до табл. 1.6.2.

1.6. Установити $E_3 = 2$ В і повторити дії за п.п. 1.2–1.5. Результати вимірювань занести до табл. 1.6.3 і 1.6.4.

1.7. Установити $E_3 = -2$ В і повторити дії за п.п.1.2–1.5. Результати вимірювань занести до табл. 1.6.5 і 1.6.6.

Table 1.6.1. Voltage and current time dependence (according to 1.2)
Таблиця 1.6.1. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 1.2)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

Table 1.6.2. Voltage and current time dependence (according to 1.5)

Таблиця 1.6.2. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 1.5)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

Table 1.6.3. Voltage and current time dependence (according to 1.6; 1.2)

Таблиця 1.6.3. Часові залежності струму й напруги (відповідно до пп. 1.6; 1.2)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

Table 1.6.4. Voltage and current time dependence (according to 1.6; 1.5)

Таблиця 1.6.4. Часові залежності струму й напруги (відповідно до пп. 1.6; 1.5)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

Table 1.6.5. Voltage and current time dependence (according to 1.7; 1.2)

Таблиця 1.6.5. Часові залежності струму й напруги (відповідно до пп. 1.7; 1.2)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

Table 1.6.6. Voltage and current time dependence (according to 1.7; 1.5)

Таблиця 1.6.6. Часові залежності струму й напруги (відповідно до пп. 1.7; 1.5)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

2. Study the processes in an RC -circuit connected to a harmonic voltage source.

2. Вивчити процеси в RC -колі при ввімкненні його на гармонічну напругу.

2.1. Set up a circuit in accordance with Fig. 1.6.2.

Set the parameters of the switch Sw 2 according to the metering circuit description.

Connect the circuit to the source of harmonious voltage E_2 with the switch Sw 1.

Set the initial phase of the oscillator at the moment of switching $\varphi = \pi/2 + \arctg\omega t$. For this purpose set the moments of switching using the options of the key Sw 3 $t_3 = 1,475$ ms and $t_4 = 40$ ms.

2.2. Make the following modelling. On the oscilloscope, display the oscillogram of current in the circuit and that of voltage across the capacitor in the time range 0...5 ms. Measure the time-dependence of the current and that of the voltage with a step of 0,1 ms. Enter the measured data to Table 1.6.7.

Table 1.6.7. Voltage and current time dependence (according to 2.2)
Таблиця 1.6.7. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 2.2)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

2.3. Calculate the time-dependence of the current and that of the voltage in accordance with relationships (1.6.13) and (1.6.14).

2.4. Draw to scale the calculated and experimental time-

2.1. Скласти схему згідно з рис. 1.6.2. Установити параметри ключа Кл.2 відповідно до опису вимірювальної схеми. Ключем Кл.1 підключити до схеми джерело гармонічної напруги E_2 . Установити початкову фазу генератора в момент комутації $\varphi = \pi/2 + \arctg\omega t$. Для цього встановити моменти комутації опціями ключа Кл.3 $t_3 = 1,475$ мс, $t_4 = 40$ мс.

2.2. Провести моделювання. Вивести на екран осцилографа епюри струму в колі й напруги на конденсаторі в часовому діапазоні 0...5 мс. Виміряти часові залежності струму й напруги із кроком 0,1 мс Результати вимірювань занести до табл. 1.6.7.

2.3. Розрахувати часові залежності струму й напруги відповідно до співвідношень (1.6.13) і (1.6.14).

2.4. Зобразити у вигляді графіків розрахункові й експе-

dependences of the current and those of the voltage. Compare them and make conclusions.

2.5. Set the initial phase of the oscillator at the moment of switching $\varphi = \arctg \cot$. For this purpose change the moment of switching, using the options of the switch Sw 3, to set $t_3 = 1,225$ ms and $t_4 = 40$ ms. Then repeat the steps according to 2.2. Enter the obtained data to Table 1.6.8.

Table 1.6.8. Voltage and current time dependence (according to 2.5)

Таблиця 1.6.8. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 2.5)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

2.6. Calculate the time-dependence of the current and that of the voltage in accordance with relationships (1.6.11) and (1.6.12).

2.7. Draw to scale the calculated and experimental time-dependences of the current and those of the voltage. Compare them and make conclusions.

2.8. Set $E_3 = 1$ V, $t_3 = 1,225$ ms, $t_4 = 40$ ms. Repeat the steps according to 2.2. Enter the obtained data to Table 1.6.9.

2.9. Calculate the time-dependence of the current and that of the voltage in accordance with relationships (1.6.13) and (1.6.14).

риментальні залежності струму й напруги від часу. Порівняти їх, зробити висновки.

2.5. Установити початкову фазу генератора в момент комутації $\varphi = \arctg \cot$. Для цього поміняти момент комутації опціями ключа Кл.3, установивши величини $t_3 = 1,225$ мс, $t_4 = 40$ мс. Повторити дії згідно з п.п. 2.2. Результати вимірювань занести до табл. 1.6.8.

2.6. Розрахувати часові залежності струму й напруги відповідно до співвідношень (1.6.11) і (1.6.12).

2.7. Зобразити у вигляді графіків розрахункові й експериментальні залежності струму й напруги від часу. Порівняти їх, зробити висновки.

2.8. Установити $E_3 = 1$ В, $t_3 = 1,225$ мс, $t_4 = 40$ мс і повторити дії згідно з п.п. 2.2. Результати вимірювань занести до табл. 1.6.9.

2.9. Розрахувати часові залежності струму й напруги відповідно до співвідношень (1.6.13) і (1.6.14).

2.10. Draw to scale the calculated and experimental time-dependences of the current and those of the voltage. Compare them and make conclusions.

2.10. Зобразити у вигляді графіків розрахункові й експериментальні залежності струму й напруги від часу. Порівняти їх, зробити висновки.

Table 1.6.9. Voltage and current time dependence (according to 2.9)
Таблиця 1.6.9. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 2.9)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

3. Make an experimentation paper containing the results of the study and your conclusions.

3. Підготувати звіт з результатами проведених досліджень і висновками.

Laboratory work 7

TRANSIENT PROCESSES IN SECOND-ORDER CIRCUITS

(Estimated time:
2 hours)

Aim of the work. Learning the time characteristics of transient processes in series aperiodic and oscillatory *RLC*-circuits powered by a constant and a harmonic voltages by means of modeling in the Electronics Workbench environment. Plot a graph of time dependence of current in the circuit and voltage across the elements of this circuit.

Лабораторна робота 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

(Рекомендований обсяг занять:
2 год)

Мета роботи. Вивчити часові характеристики перехідних процесів у послідовному аперіодичному й коливальному *RLC*-колі під час ввімкнення його на постійну й гармонічну напругу за допомогою моделювання в середовищі програми Electronics Workbench. Побудувати графіки часових залежностей струму в дослідженому контурі й напруги на його елементах.

To be well prepared for this laboratory work, a student should study the present description as well as appropriate units of the recommended literature, and be able to answer the following test questions.

Test questions

1. What is a transient process? Why do transient processes occur?

2. State the laws of commutation. What does their physics consist in?

3. What are initial conditions? What kinds of initial conditions do you know?

4. State the general approach to transient process calculation.

5. What is the operational method of transient process calculation?

6. What is an *RLC* - circuit of the second order?

7. What secondary parameters characterize an oscillatory circuit?

8. What is the aperiodic operating mode of an oscillatory circuit?

9. What is the oscillatory operating mode of an oscillatory circuit?

10. What does the term "envelope of an oscillatory process" mean?

Brief theoretical information

The general approach to the analysis of transient processes in second order circuits consists in the fact that voltages and currents in a post-commutation circuit are calculated for points in time $t > 0$, the initial conditions being defined by the laws of commutation.

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно вивчити відповідний матеріал за рекомендованою літературою, а також уміти відповідати на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Що таке перехідний процес? У чому причина виникнення перехідних процесів?

2. Сформулюйте закони комутації. У чому їх фізична сутність?

3. Що таке початкові умови? Назвіть види початкових умов.

4. Сформулюйте загальний підхід до розрахунку перехідних процесів.

5. Що таке операторний метод розрахунку перехідних процесів?

6. Що таке *RLC* - коло другого порядку?

7. Якими вторинними параметрами характеризується коливальний контур?

8. Що таке аперіодичний режим роботи коливального контуру?

9. Що таке коливальний режим роботи коливального контуру?

10. Що означає термін «обвідна коливального процесу»?

Основні теоретичні відомості

Загальний підхід до аналізу перехідних процесів у колах другого порядку полягає в тому, що виконується розрахунок напруг і струмів у післякомутаційному колі для моментів часу $t > 0$ за початкових умов, обумовлених законами комутації.

For example, for an RLC -circuit connected to a direct voltage source (Fig. 1.7.1), when closing the switch at the point $t=0$, we get a closed circuit for which according to Kirchhoff's law for voltages:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + u_C - E = 0.$$

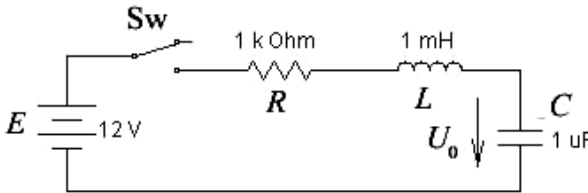


Fig. 1.7.1. RLC -circuit connection to the source of direct voltage
Рис. 1.7.1. Підключення RLC -кола до джерела постійної напруги

As

Оскільки

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \tag{1.7.1}$$

the processes in a circuit for $t > 0$ are described by the equation

то процеси в колі при $t > 0$ описуються рівнянням

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E \tag{1.7.2}$$

under the initial conditions

за початкових умов

$$u_C(t=0) = U_0. \tag{1.7.3}$$

The solution of equations (1.7.2) and (1.7.3) gives dependence of voltage across the capacitor on time

Розв'язавши рівняння (1.7.2) і (1.7.3), дістанемо залежність напруги на конденсаторі від часу

$$u_C = E + \frac{E - U_0}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t})$$

and the current through the capacitor (according to (1.7.1)): і величину струму через конденсатор (згідно з рівнянням (1.7.1)):

$$i_C = \frac{E - U_0}{(p_1 - p_2)L} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}),$$

where

де

$$p_1 = -\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}; \quad p_2 = -\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2};$$

$$\delta = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

For the circuit in Fig. 1.7.1 we can distinguish the following processes:

Для схеми рис. 1.7.1 розрізняють такі процеси:

1. $E = 0; U_0 \neq 0$. It is a process of free damped oscillations in an RLC -circuit in which a capacitor charged to a voltage U_0 is completely discharged. The dependence of voltage across this capacitor on time is described by the function

1. $E = 0; U_0 \neq 0$. Це процес вільних загасальних коливань у RLC -колі, за якого конденсатор, заряджений до напруги U_0 , повністю розряджається. Залежність напруги на ньому від часу описується функцією

$$u_C = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}), \quad (1.7.4)$$

and current

а струму

$$i_C = \frac{U_0}{(p_2 - p_1)L} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (1.7.5)$$

Depending on the initial parameters of an oscillatory circuit,

Залежно від первинних параметрів коливального контуру

there may be three operating conditions of oscillations in it:

1.1. *Aperiodic operation:* $\delta > \omega_0$, i.e. p_1 and p_2 are real, negative and different numbers. The oscillations look like nonharmonic monotonous functions.

1.2 *Critical operation:* $\delta = \omega_0$, i.e. $p_1 = p_2$ are real, negative and equal numbers.

1.3. *Oscillatory operation:* $\delta < \omega_0$, i.e. p_1 and p_2 are complex and complex-conjugate numbers. In this case the relationships (1.7.4), (1.7.5) become simpler

в ньому можливі два режими коливань:

1.1. *Аперіодичний режим:* $\delta > \omega_0$, тобто p_1 і p_2 – дійсні, від’ємні та різні числа. Коливання мають вигляд негармонічних монотонних функцій.

1.2. *Критичний режим:* $\delta = \omega_0$, тобто $p_1 = p_2$ – дійсні, від’ємні та однакові числа.

1.3. *Колівальний режим:* $\delta < \omega_0$, тобто p_1 і p_2 – комплексні й комплексно-спряжені числа. У цьому випадку співвідношення (1.7.4), (1.7.5) спрощуються і набувають вигляду

$$u_C = \frac{\omega_0}{\omega_{\text{forced}}} U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{forced}} t + \alpha), \quad (1.7.6)$$

$$i_C = -\frac{1}{\omega_{\text{forced}} L} U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{forced}} t) = -A(t) \sin(\omega_{\text{forced}} t), \quad (1.7.7)$$

where

де

$$\omega_{\text{forced}} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}; \quad \alpha = \arctg \frac{\omega_{\text{forced}}}{\delta}.$$

In the ratio (1.7.6) exponential function

У співвідношенні (1.7.6) експонентна функція

$$A(t) = \frac{U_0}{\omega_{\text{forced}} L} e^{-\delta t}$$

defines the slowly changing amplitude of harmonic oscillations and is termed the envelope of a harmonic current.

визначає повільно змінну амплітуду гармонічних коливань і називається обвідною гармонічного струму.

2. $E \neq 0$; $U_0 = 0$. It is a transient process with zero initial conditions when an *RLC*-circuit is

2. $E \neq 0$; $U_0 = 0$. Це перехідний процес із нульовими початковими умовами при вві-

connected to a direct voltage source.

The dependence of voltage across the capacitor on time is described by the function

$$u_C = E + \frac{E}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}), \quad (1.7.8)$$

and the current through the capacitor

$$i_C = \frac{E}{(p_1 - p_2)L} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (1.7.9)$$

In the oscillatory mode:

$$u_C = E - \frac{\omega_0}{\omega_{\text{forced}}} E e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{forced}} t + \alpha); \quad (1.7.10)$$

$$i_C = \frac{1}{\omega_{\text{forced}} L} E e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{forced}} t). \quad (1.7.11)$$

The shown approach being applied to the analysis of a transient process that occurs during connection of an *RLC*-circuit to a source of harmonic voltage with a frequency ω_g

$$E = E_m \sin(\omega_g t + \varphi)$$

leads to rather difficult formulae. However for the most wide-spread case,

$$U_0 = 0, \quad \delta < \omega_0, \quad \omega_0 \approx \omega_g$$

it is possible to obtain quite a simple expression for the current envelope

мкненні *RLC*-контуру на постійну напругу.

Залежність напруги на конденсаторі від часу описується функцією

а струм через конденсатор

У коливальному режимі:

Продемонстрований підхід, будучи застосованим до аналізу перехідного процесу, що виникає під час підключення *RLC*-контуру до джерела гармонічної напруги із частотою ω_g

призводить до досить складних формул. Однак для найпоширенішого варіанта

можна одержати досить просте співвідношення для обвідної струму

$$i = I_m(1 - e^{-\delta t}), \quad (1.7.12)$$

where

де

$$I_m = \frac{\omega_0 E}{2\delta\omega_{\text{forced}} L}. \quad (1.7.13)$$

The measuring circuit

The measuring circuit is shown in Fig. 1.7.2. Here the *RLC*-circuit of the first order is connected, by means of the key Sw 3, to the source of direct (E_1) or alternating (E_2) voltage.

The moments of connection t_3 and disconnection t_4 are provided by the options of Sw 3 and are set $t_3 = 1$ ms and $t_4 = 40$ ms. The kind of source (E_1 or E_2) is established by the key Sw 1. The capacitor is previously charged by the source E_3 which is connected to the capacitor at a moment t_1 and disconnected at a moment t_2 . The moments of connection t_1 and disconnection t_2 are provided by the options of Sw 2 and are set $t_1 = 0$ ms and $t_2 = 0,9$ ms. The parameters of the voltage sources are established by their options. The current is measured as a voltage drop across the resistor $r = 1$ Ohm, i.e. a voltage drop of 1 mV corresponds to a current of 1 mA.

Опис вимірювальної схеми

Вимірювальну схему показано на рис. 1.7.2. У ній *RLC*-коло за допомогою ключа Кл.3 підключається до джерела постійної (E_1) або змінної (E_2) напруги.

Моменти часу підключення t_3 і вимкнення t_4 Кл.3 задаються його опціями й встановлюються $t_3 = 1$ мс, $t_4 = 40$ мс. Вид джерела (E_1 або E_2) встановлюється ключем Кл.1. Конденсатор заздалегідь заряджається джерелом E_3 , підключеним до конденсатора в момент часу t_1 , що вимикається в момент часу t_2 . Моменти часу підключення t_1 і вимкнення t_2 Кл.2 задаються його опціями й встановлюються $t_1 = 0$ мс, $t_2 = 0,9$ мс. Параметри джерел напруги встановлюються їх опціями. Струм вимірюється величиною падіння напруги на резисторі $r = 1$ Ом, тобто 1 мВ падіння напруги відповідає струму 1 мА.

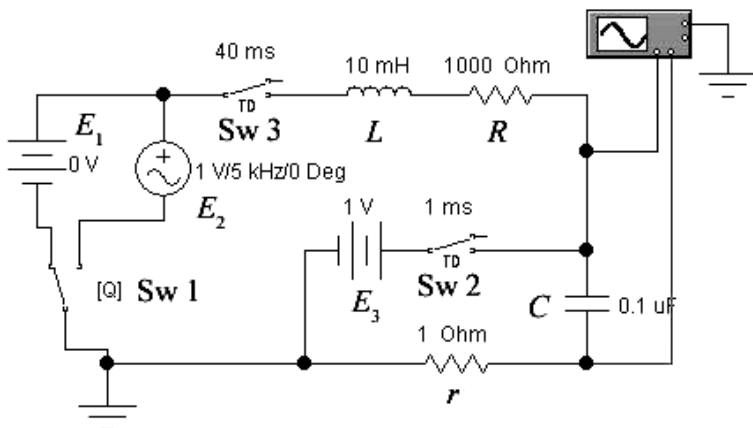


Fig. 1.7.2. The measuring circuit
Рис. 1.7.2. Вимірювальна схема

Working procedure

1. Study the processes in an RLC -circuit powered by direct voltage. For this purpose carry out actions described in 1.1–1.19.

1.1. Set up a circuit according to Fig. 1.7.2.

Set the parameters of the keys Sw 2 and Sw 3 according to the measuring circuit description. With the help of the switch Sw 1 connect the circuit to the source of direct voltage E_1 .

1.2. Carry out modeling of free oscillations for the case of aperiodic operation. On the oscillograph, display the oscillogram of current

Порядок моделювання вимірювань та аналіз його результатів

1. Вивчити процеси в RLC -колі під час ввімкнення його на постійну напругу.

1.1. Зібрати схему згідно з рис. 1.7.2.

Установити параметри ключів Кл.2 і Кл.3 відповідно до опису вимірювальної схеми. Ключем Кл.1 підключити до схеми джерело постійної напруги E_1 .

1.2. Провести моделювання процесу вільних коливань в аперіодичному режимі. Вивести на екран осцилографа епюри

in the circuit and that of voltage across the capacitor in the time range 0...3 ms. Measure the time-dependence of the current and that of the voltage with a step of 0,1 ms. Enter the measured data to Table 1.7.1.

струму в колі й напруги на конденсаторі в часовому діапазоні 0...3 мс. Виміряти часові залежності струму й напруги із кроком 0,1 мс Результати вимірювань занести до табл. 1.7.1.

Table 1.7.1. Voltage and current time dependence (according to 1.2)

Таблиця 1.7.1. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 1.2)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

1.3. Calculate the time-dependence of the current and that of the voltage in accordance with (1.7.4) and (1.7.5).

1.3. Розрахувати часові залежності струму й напруги відповідно до (1.7.4) і (1.7.5).

1.4. Draw to scale the calculated and experimental time-dependences of the current and those of the voltage. Compare them and make conclusions.

1.4. Зобразити у вигляді графіків розрахункові й експериментальні залежності струму й напруги від часу. Порівняти їх, зробити висновки.

1.5. Change the value of R to 100 Ohm and carry out modeling of free oscillations for the case of oscillatory operation. On the oscillograph, display the oscilligram of current in the circuit and that of voltage across the capacitor in the time range 0...3 ms. Measure the time-dependence of the current and that of the voltage with a step of 0,1 ms. Enter the measured data to Table 1.7.2.

1.5. Змінити величину параметра R на 100 Ом і провести моделювання процесу вільних коливань у коливальному режимі. Вивести на екран осцилографа епюри струму в колі й напруги на конденсаторі в часовому діапазоні 0...3 мс. Виміряти часові залежності струму й напруги із кроком 0,1 мс Результати вимірювань занести до табл. 1.7.2.

Table 1.7.2. Voltage and current time dependence (according to 1.5)

Таблиця 1.7.2. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 1.5)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

1.6. Calculate the time-dependence of the current and that of the voltage in accordance with (1.7.6) and (1.7.7).

1.7. Draw to scale the calculated and experimental time-dependences of the current and those of the voltage. Compare them and make conclusions.

1.8. Set the value of R corresponding to a critical operating condition and carry out modeling of free oscillations for the case of critical operation. On the oscillograph, display the oscillogram of current in the circuit and that of voltage across the capacitor in the time range 0...3 ms. Measure the time-dependence of the current and that of the voltage with a step of 0,1 ms. Enter the measured data to Table 1.7.3.

1.6. Розрахувати часові залежності струму й напруги відповідно до (1.7.6) і (1.7.7).

1.7. Зобразити у вигляді графіків розрахункові й експериментальні залежності струму й напруги від часу. Порівняти їх, зробити висновки.

1.8. Установити величину параметра R , що відповідає критичному режиму й провести моделювання процесу вільних коливань у критичному режимі. Вивести на екран осцилографа епюри струму в колі й напруги на конденсаторі в часовому діапазоні 0...3 мс. Виміряти часові залежності струму й напруги із кроком 0,1 мс. Результати вимірювань занести до табл. 1.7.3.

Table 1.7.3. Voltage and current time dependence (according to 1.8)

Таблиця 1.7.3. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 1.8)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

1.9. Draw to scale the experimental dependence of current and

1.9. Зобразити у вигляді графіків експериментальні за-

voltage on time for aperiodic, critical and oscillatory operation. Compare them and draw conclusions.

1.10. In the circuit (Fig. 1.7.2) set $E_3 = 0$ V, $E_1 = 0$ V.

1.11. Model the process of *RLC*-circuit connection to a source of direct voltage for the case of aperiodic operation. On the oscillograph, display the oscillogram of current in the circuit and that of voltage across the capacitor in the time range 0...3 ms. Measure the time-dependence of the current and that of the voltage with a step of 0,1 ms. Enter the measured data to Table 1.7.4.

Table 1.7.4. Voltage and current time dependence (according to 1.11)
Таблиця 1.7.4. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 1.11)

<i>t</i> , ms								
<i>U</i> , mV								
<i>I</i> , mA								

1.12. Calculate the time-dependence of the current and that of the voltage in accordance with (1.7.8) and (1.7.9).

1.13. Draw to scale the calculated and experimental time-dependences of the current and those of the voltage. Compare them and make conclusions.

лежності струму й напруги від часу для аперіодичного, критичного й коливального режимів. Порівняти їх, зробити висновки.

1.10. На схемі згідно з рис. 1.7.2 установити $E_3 = 0$ В, $E_1 = 0$ В.

1.11. Провести моделювання процесу підключення *RLC*-контурю в аперіодичному режимі до джерела постійної напруги. Вивести на екран осцилографа епюри струму в колі й напруги на конденсаторі в часовому діапазоні 0...3 мс. Виміряти часові залежності струму й напруги із кроком 0,1 мс. Результати вимірювань занести до табл. 1.7.4.

1.12. Розрахувати часові залежності струму й напруги відповідно до (1.7.8) і (1.7.9).

1.13. Зобразити у вигляді графіків розрахункові й експериментальні залежності струму й напруги від часу. Порівняти їх, зробити висновки.

1.14. Change the value of R to 100 Ohms and model the process of RLC -circuit connection to a source of direct voltage for the case of oscillatory operation. On the oscillograph, display the oscillogram of current in the circuit and that of voltage across the capacitor in the time range 0...3 ms. Measure the time-dependence of the current and that of the voltage with a step of 0,1 ms. Enter the measured data to Table 1.7.5.

1.14. Змінити величину параметра R на 100 Ом і провести моделювання процесу підключення RLC - контуру в коливальному режимі до джерела постійної напруги. Вивести на екран осцилографа епюри струму в колі й напруги на конденсаторі в часовому діапазоні 0...3 мс. Виміряти тимчасові залежності струму й напруги із кроком 0,1 мс. Результати вимірювань занести до табл. 1.7.5.

Table 1.7.5. Voltage and current time dependence (according to 1.14)
Таблиця 1.7.5. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 1.14)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

1.15. Calculate the time-dependence of the current and that of the voltage in accordance with (1.7.10) and (1.7.11).

1.15. Розрахувати часові залежності струму й напруги відповідно до (1.7.10) і (1.7.11).

1.16. Draw to scale the calculated and experimental time-dependences of the current and those of the voltage. Compare them and make conclusions.

1.16. Зобразити у вигляді графіків розрахункові й експериментальні залежності струму й напруги від часу. Порівняти їх, зробити висновки.

1.17. Set the value of R corresponding to a critical operation condition and model the process of RLC -circuit connection to a source of direct voltage for the case of critical operation. On the oscillograph, display the oscillogram of current in the

1.17. Установити величину параметра R , що відповідає критичному режиму, і провести моделювання процесу підключення RLC - контуру в критичному режимі до джерела постійної напруги. Вивести на екран осцилографа епюри струму

circuit and that of voltage across the capacitor in the time range 0...3 ms. Measure the time-dependence of the current and that of the voltage with a step of 0,1 ms. Enter the measured data to Table 1.7.6.

в колі й напруги на конденсаторі в часовому діапазоні 0...3 мс. Виміряти часові залежності струму й напруги із кроком 0,1 мс. Результати вимірювань занести до табл. 1.7.6.

Table 1.7.6. Voltage and current time dependence (according to 1.17)

Таблиця 1.7.6. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 1.17)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

1.18. Draw to scale the experimental dependence of current and voltage on time for aperiodic, critical and oscillatory operation. Compare them and draw conclusions.

1.18. Зобразити у вигляді графіків експериментальні залежності струму й напруги від часу для аперіодичного, критичного й коливального режимів. Порівняти їх, зробити висновки.

2. Study the processes in an RLC -circuit powered by harmonious voltage.

2. Вивчити процеси в RLC - колі при ввімкненні його на гармонічну напругу.

2.1. In the circuit according to the Fig. 1.7.2, set the parameters of the switches Sw 1 and Sw 2 according to the measuring circuit description. Set $E_3 = 0$ V and $R = 100$ Ohm. With the help of the switch Sw 1 connect the circuit to the source of harmonious voltage E_2 .

2.1. У схемі згідно з рис. 1.7.2 установити параметри ключів Кл.1 і Кл.2 відповідно до опису вимірювальної схеми. Установити напругу джерела $E_3 = 0$ В та опір $R = 100$ Ом. Ключем Кл.1 підключити до схеми джерело гармонічної напруги E_2 .

2.2. Model the occurrence of forced oscillations in the circuit for the case of oscillatory operation. On the oscillograph, display the oscillogram of current in the circuit and that of voltage across the capa-

2.2. Провести моделювання виникнення змушених коливань у контурі, що працює в коливальному режимі. Вивести на екран осцилографа епюри струму в колі й напруги на

citor in the time range 0...3 ms. Measure the time-dependence of the current and that of the voltage with a step of 0,1 ms. Enter the measured data to Table 1.7.7.

конденсаторі в часовому діапазоні 0...3 мс. Виміряти часові залежності струму й напруги із кроком 0,1 мс. Результати вимірювань занести до табл. 1.7.7.

Table 1.7.7. Voltage and current time dependence (according to 2.2)

Таблиця 1.7.7. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 2.2)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

2.3. Calculate the time-dependence of the current and that of the voltage in accordance with (1.7.12) and (1.7.13).

2.3. Розрахувати часові залежності обвідної струму відповідно до (1.7.12) і (1.7.13).

2.4. Draw to scale the calculated and experimental time-dependences of the current and those of the voltage. Compare them and make conclusions.

2.4. Зобразити у вигляді графіків розрахункові й експериментальні залежності струму й напруги від часу. Порівняти їх, зробити висновки.

2.5. Change the value of R to 50 Ohms and repeat the steps in accordance to 2.1–2.4. Enter the measured results to Table 1.7.8.

2.5. Змінити величину параметра R на 50 Ом і повторити дії згідно з п.п. 2.1–2.4. Результати вимірювань занести до табл. 1.7.8.

Table 1.7.8. Voltage and current time dependence (according to 2.5)

Таблиця 1.7.8. Часові залежності струму й напруги (відповідно до п. 2.5)

t , ms								
U , mV								
I , mA								

3. Make an experimentation paper containing the results of the study and your conclusions

3. Підготувати звіт з результатами проведених досліджень і висновками.

REQUIREMENTS TO THE STUDY RECORD

When carrying out laboratory works the student is obliged to do all tasks that are given in the Manual. The results are to be presented in a study record that should contain a copy of the Laboratory work description including the tables filled, the graphs and oscillograms drawn on graph paper, and the page of Conclusions.

ВИМОГИ ДО ЗВІТУ

Під час виконання лабораторних робіт студент зобов'язаний виконати всі завдання, що наведені у посібнику. Результати необхідно подати у звіті, що містить копію опису лабораторної роботи із заповненими таблицями, графіками та осцилограмами, виконаними на міліметровому папері, та висновки.

Part 2
PRACTICAL CLASSES
INTRODUCTION

General directions. The objective of practical classes is to help the student to learn the basic facts of the theory of linear electric circuits and acquire skills in analytical calculation of elementary circuits using the basic studied methods. Therefore, the methodological learning material presented below implies that the student has got acquainted with the material of the lectures and the recommended literature on the subject before the practical class.

During employment the student can learn under the direction of the teacher to use theoretical knowledge for calculation of electric circuits. Fastening of habits of calculations is supposed at performance of house problems which should be executed in writing in deadlines.

**Software
and Equipment**

The methodological learning material presented below implies that analytical calculations to be carried out are simple enough for the student to use ordinary calculators, which students are supposed to have, rather than electronic computers.

Частина 2
ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ
ВСТУП

Загальні вказівки. Практичні заняття мають на меті допомогти студенту засвоїти основні положення теорії лінійних електричних кіл та набутти навичок аналітичного розрахунку найпростіших кіл з використанням основних вивчених методів. Тому викладений нижче методичний навчальний матеріал передбачає, що студент ознайомився з матеріалом лекцій і рекомендованої літератури з теми перед початком практичного заняття.

Під час заняття студент має навчитися під керівництвом викладача використовувати теоретичні знання для розрахунку електричних кіл. Закріплення навичок розрахунків передбачається у процесі виконання домашніх завдань у письмовій формі та у стислі терміни.

**Обладнання та програмне
забезпечення**

Викладений нижче методичний навчальний матеріал передбачає, що студент виконує аналітичні розрахунки, тому використовувати електронно-обчислювальні машини не потрібно. Для досить простих числових розрахунків не обхідно застосовувати інженерні калькулятори.

Personal computers may be used in doing homework to perform calculations and build graphs, including calculation-graphic work using software that the student is familiar with.

Practical class 1

BASIC LAWS OF CURRENT FLOW

Aim of the class. The class is aimed at students acquiring the ability to practically apply Ohm's law for analyzing electric circuits with an EMF and Kirchhoff's laws for parallel circuits.

Methodological recommendations

Before starting to solve the problems, it is necessary to make revision and learn the necessary material on the theory of linear electric circuits.

Basic definitions. An electric circuit is an idealized model of an electrical or radio device presented by a collection of idealized components that form a path for electric current.

There exist active and passive circuit components. Resistors r , inductors L and capacitors C are

Допускається використання персональних комп'ютерів під час виконання домашніх завдань для розрахунків та побудови графіків, у тому числі домашньої розрахунково-графічної роботи за допомогою того програмного забезпечення, яке студент опанував.

Практичне заняття 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ЗАКОНІВ СТРУМОПРОХОДЖЕННЯ

Мета заняття. Забезпечити набуття студентами умінь практично застосовувати закон Ома для аналізу ділянки кола з ЕРС, закони Кірхгофа для опису розгалужених кіл.

Методичні рекомендації

Перед розв'язанням задач необхідно повторити й засвоїти такі питання теорії лінійних електричних кіл.

Основні визначення. Електричним колом називають ідеалізовану модель електро- або радіотехнічного пристрою, подану сукупністю ідеалізованих елементів, що утворюють шлях для електричного струму.

Розрізняють пасивні й активні елементи кола. До пасивних належать опори r , індуктивність

passive components. As resistance in general is the relation of the voltage u to the current i in a circuit, this concept is also applied to inductive and capacitive elements. To avoid ambiguity, resistance is often referred to as active, although r is a passive element.

Active circuit components are sources of energy. There exist sources of electro-motive force (EMF) and sources of current (Fig. 2.1.1). It is considered that voltage on the terminals of an ideal EMF source does not depend on the current passing through it. A current created by an ideal source of current is considered to be independent on its terminal voltage.



Fig. 2.1.1. Sources of electro-motive force and sources of current
Рис. 2.1.1. Джелело ЕРС та джерело струму

The concepts of branch, node, and loop belong to the basic topological concepts in the theory of electric circuits.

A branch is a circuit consisting of one or several elements connected in series the current through which is the same.

L , ємність C . Оскільки опором взагалі є відношення напруги u до струму i на деякій ділянці кола, це поняття застосовують також і до індуктивних, і ємнісних елементів. Для визначеності опір часто називають активним, хоча r – пасивний елемент.

Активні елементи кола – це джерела енергії. Розрізняють джерела напруги і джерела струму (рис. 2.1.1). Вважається, що напруга на ідеальному джерелі напруги не залежить від струму, що протікає у ньому. В ідеальному джерелі струму струм не залежить від напруги на його затискачах.

Основними топологічними поняттями у теорії кіл є гілка, вузол, контур.

Гілка – ділянка електричного кола, що являє собою послідовне з'єднання одного або декількох елементів, через які в будь-який момент часу протікає однаковий струм.

A node is a place where three or more branches come together.

A loop is a closed path passing through several branches.

Choosing the direction of currents and voltages in a circuit.

Before analyzing or calculating a circuit, the true directions of currents and voltages in its subcircuits may be unknown. It is necessary to conditionally accept the positive directions of currents and voltages designating them with arrows. The direction of current is designated by an arrow on a corresponding branch of the circuit, the direction of voltage – by an arrow drawn near a corresponding element of the circuit.

If the values of currents and voltages found as a result of calculation is positive, it means that their true directions coincide with the conditionally positive ones; otherwise – they are opposite.

The directions of EMF and those of voltage and current sources are shown with arrows inside the circuit. It is assumed that a current inside the source flows from “–” to “+”, i.e. from the lower potential to the higher one. It is considered that currents in passive elements as well as voltages across them have the same directions (a currents flows from the point with a

Вузол – місце з’єднання трьох і більше гілок.

Контур – замкнений шлях, що проходить по декількох гілках.

Вибір напрямків струмів і напруг кола.

До виконання аналізу або розрахунку кола реальні напрямки струмів і напруг на ділянках кола можуть бути невідомі. Необхідно покласти довільно умовно додатні напрями струмів і напруг, позначивши їх стрілками. Напрямок струму позначають стрілкою на гілці, напрямок напруги – стрілкою, розміщеною поруч з відповідним елементом кола.

Якщо значення струмів і напруг, знайдених у результаті розрахунку, виявляться додатними, це означає, що їх дійсні напрямки збігаються з обраними умовно-додатними; у протилежному випадку – вони протилежні.

Напрямок ЕРС, джерел напруги і струмів джерел струму показують стрілками всередині кола. Передбачається, що всередині джерел струми протікають від «–» до «+», тобто від нижчого потенціалу до вищого. Напрямок струмів та напруг на пасивних елементах вважаються збіжними (струми протікають від точки з вищим потенціалом до точки з нижчим, тобто від «+» до «–»).

higher potential to the point with a lower potential, i.e. from “-” to “+”).

Ohm’s and Kirchoff’s laws are the basic laws of circuit theory.

Ohm`s law.

1. Ohm`s law for a passive circuit (Fig. 2.1.2): a potential drop across a resistor is equal to the product of its resistance and the amount of current flowing through it:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = Ir \quad \text{or} \quad I = \frac{U_{12}}{r}$$

До основних законів теорії електричних кіл належать закони Ома й Кірхгофа.

Закон Ома.

1. Закон Ома для пасивного кола (рис. 2.1.2): падіння напруги на опорі дорівнює добутку величини цього опору на величину струму, що протікає по ньому:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = Ir \quad \text{або} \quad I = \frac{U_{12}}{r} .$$

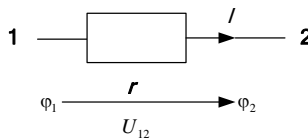


Fig. 2.1.2. Resistance
Рис. 2.1.2. Опір

2. Ohm`s law for a subcircuit with an EMF (Fig.2.1.3):

2. Закон Ома для ділянки кола з ЕРС (рис. 2.1.3):

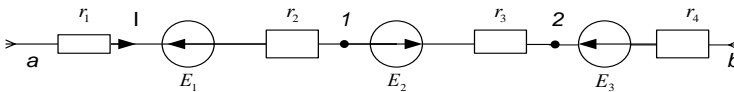


Fig. 2.1.3. Subcircuit with EMF
Рис. 2.1.3. Ділянка кола з ЕРС

$$\varphi_b = \varphi_a - Ir_1 - Ir_2 - Ir_3 - Ir_4 - E_1 + E_2 - E_3$$

or

або

$$\varphi_b = \varphi_a - I \sum_a^b r + \sum_a^b E, \quad U_{ab} = I \sum r - \sum E .$$

Here by $\sum_a^b r$ we mean the sum of all resistances connected in series in a subcircuit ab , and $\sum_a^b E$ is the algebraic sum of all the EMF. In this case, those EMF whose directions coincide with the conditionally positive direction of current are taken with the “+” sign, the others – with the “-” sign. Hence:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \sum_a^b E}{\sum_a^b r} = \frac{U_{ab} + \sum_a^b E}{\sum_a^b r}.$$

Kirchhoff’s laws are, in fact, conservation laws that play an essential role in physics, and, being fundamental laws, are held for any circuit. They constitute the basis of different methods of circuit analysis.

Kirchhoff’s current law is applied to nodes (Fig. 2.1.4) and it states that the algebraic sum of currents in a node is equal to zero: $\sum I = 0$. In an equation for a node all inward currents are taken with one sign (for example “+”), and all outward currents are taken with the opposite sign.

Тут під символом $\sum_a^b r$ розу- міють суму всіх опорів, увімк- нених послідовно на ділянці ab , а $\sum_a^b E$ – алгебричну суму всіх ЕРС. При цьому ті ЕРС, напрям яких збігається з обраним умовно- додатним напрямком струму, беруться зі знаком «+», інші – зі зна- ком «-». Звідси:

Закони Кірхгофа є, по суті, законами збереження або стало- сті, що відіграють вагому роль у фізиці, і як основні закони справедливі для будь-якого кола. Вони лежать в основі методів аналізу кіл.

Закон Кірхгофа для струмів застосовують до вузлів (рис. 2.1.4) і формулюється в та- кий спосіб: алгебрична сума струмів у вузлі дорівнює нулю: $\sum I = 0$. У рівнянні для всіх струмів, що протікають до вузла, вибирається один знак (напри- клад, «+»), а для всіх струмів, що витікають із вузла, – протилеж- ний знак.

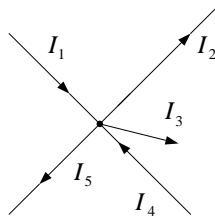


Fig. 2.1.4. Circuit node
Рис. 2.1.4. Вузол

Kirchhoff's voltage law is applied to electric loops and it states that in any loop the algebraic sum of voltages across the terminals of branches included in this loop is equal to zero: $\sum U = 0$.

To use this law, the direction of loop tracing should be chosen. Voltages whose conditionally positive directions coincide with the direction of loop tracing are given the "+" sign, the others take the opposite sign.

Sometimes this law is also written as $\sum Ir = \sum E$, where Ir – voltages across the passive elements caused by currents flowing through them; E – EMF of the active elements of the circuit. For example, for a single-loop circuit (Fig. 2.1.5):

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = E - Ir_i \text{ або } I = \frac{E - (\varphi_1 - \varphi_2)}{r_i} = \frac{E - U_{12}}{r_i}.$$

Закон Кірхгофа для напруг застосовується до контурів і формулюється так: у будь-якому контурі алгебрична сума напруг на затискачах гілок, що входять у цей контур, дорівнює нулю: $\sum U = 0$.

Для того щоб скористатися цим законом, вибирають напрямок обходу контуру. Напруги, умовно-додатні напрямки яких збігаються з напрямком обходу контуру, записують зі знаком «+», інші – із знаком «-».

Іноді цей закон записують також у вигляді $\sum Ir = \sum E$, де Ir – падіння напруги на пасивних елементах, за рахунок струмів, що протікають по них; E – ЕРС активних елементів кола. Наприклад, для одноконтурного кола (рис. 2.1.5):

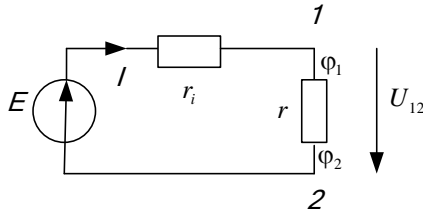


Fig. 2.1.5. Voltage divider
Рис. 2.1.5. Подільник напруг

Solution of problems

Problem 1 (see Fig. 2.1.3).

It is known: $E_1=25$ V;
 $\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = 15$ V; $E_2=32$ V;
 $E_3=8,5$ V; $r_1 = r_3 = 15$ k Ω ; $r_2 = 5,4$ k Ω ; $r_4 = 3,3$ k Ω .

Required: 1) Amount of current in a branch. 2) Potential difference between points 1 and 2; a and b ; I and b .

Discussing the problem situation. There is a circuit branching in points a and b . The circuit may have other sources of power in addition to the mentioned above. The potential difference $\varphi_a - \varphi_b = U_{ab}$ is known. It is required to find the currents in the branches and the potential differences in its subcircuits.

Discussing the approach to solving the problem. We choose the conditionally positive direction of current in the circuit, then, using

Розв'язання задач

Задача 1 (див. рис. 2.1.3).

Відомо: $E_1 = 25$ В; $E_2 = 32$ В;
 $E_3 = 8,5$ В;
 $\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = 15$ В;
 $r_1 = r_3 = 15$ кОм; $r_2 = 5,4$ кОм;
 $r_4 = 3,3$ кОм.

Потрібно: розрахувати струм у гілці. Знайти різницю потенціалів між точками 1 і 2, a і b , I і b .

Умова задачі. Задано ділянку кола, що розгалужується в точках a , b , і, можливо, містить і інші джерела енергії, крім зазначених. Різниця потенціалів $\varphi_a - \varphi_b = U_{ab}$ відома. Потрібно розрахувати струм у гілці і різницю потенціалів на окремих її ділянках.

Хід розв'язання задачі. Обираємо умовно-додатний напрям струму в колі, користуючись законом Ома для ділянки кола з ЕРС і знаходимо

Ohm's law for a circuit with an EMF, find the current. Then, the current being found, we use the same law to calculate the potential difference in the given subcircuits.

Solution procedure

We choose the conditionally positive direction of current flow from a to b , designate it with an arrow on the branch, and with another arrow we will show the direction of U_{ab} .

According to Ohm's law we will write:

$$I = \frac{U_{ab} - E_1 + E_2 - E_3}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} = \frac{15 - 25 + 32 - 8,5}{15 + 5,4 + 15 + 3,3} = \frac{13,5}{38,7} = 0,35 \text{ mA.}$$

It should be noted that, as U_{ab} and E are expressed in volts and resistances – in kilohms, we will get the current expressed in milliamperes, which we should get used to and avoid converting resistances and currents to basic units if there is no special necessity.

As the calculated current I proves to be positive, its true direction coincides with the conditionally positive one.

Now we find the potential difference between points 1 and 2 using Ohm's law for a circuit with an EMF.

струм. Потім скористаємося тим же законом для відшукання різниці потенціалів на заданих ділянках кола за відомого струму.

Розв'язання задачі

Обираємо умовно-додатний напрям струму від a до b , позначимо його стрілкою на гілці, а поруч позначимо стрілкою напрям U_{ab} .

Відповідно до закону Ома запишемо:

Варто звернути увагу, що оскільки U_{ab} й E задані у вольтях, а опір – у кілоомах, струм виходить у міліамперах, до чого варто звикнути й не переводити опори та струми в основні одиниці, якщо це не диктується необхідністю.

Струм I з розрахунку виявився додатним, а отже, істинний його напрямок збігається з умовно-додатним.

Знайдемо різницю потенціалів між точками 1 і 2. Відповідно до закону Ома для ділянки кола з ЕРС

$$U_{12} = -\sum_1^2 E + I \sum_1^2 r.$$

In the subcircuit 1, 2 there is only one EMF – E_2 and one resistor r_3 . Therefore,

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12} = -E_2 + Ir_3 = -32 + 0,35 * 15 = 32 + 5,85 = -26,75 \text{ V};$$

$$U_{12} = 26,75 \text{ V}.$$

In the subcircuit a, 1 there is also one EMF E_1 , but two resistors r_1 and r_2 . So,

$$U_{a1} = I(r_1 + r_2) + E_1 = 0,35(15 + 5,4) + 25 = 7,15 + 25 = 32,15 \text{ V}.$$

Here the true direction coincides with the conditionally positive one.

In the subcircuit 1, b there are two EMF E_2 and E_3 and two resistors r_3 and r_4 :

$$U_{1b} = -E_2 + E_3 + I(r_3 + r_4) = -32 + 8,5 + 0,35(15 + 3,3) = -23,5 + 6,4 = -17,1 \text{ V}.$$

Here the true direction of voltage is opposite to the conditional positive one.

Proving the result obtained:

$$U_{ab} = U_{a1} + U_{1b} = 32,15 - 17,1 = 15,05 \text{ V}$$

(which is given).

Conclusion from the problem solution: although the current and voltage in the branch under study have the same direction, voltages in its individual subcircuits may differ in sign.

На ділянці 1, 2 діє всього одна ЕРС E_2 і ввімкнений один опір r_3 , отже,

На ділянці a, 1 також діє одна ЕРС E_1 , але ввімкнено два опори r_1 і r_2 , отже,

Тут дійсний напрямок збігається з умовно-додатним.

На ділянці 1, b діють дві ЕРС E_2 і E_3 і ввімкнено два опори r_3 і r_4 :

Тут дійсний напрямок напруги протилежний умовно-додатному.

Перевірка:

(що й задано).

Висновки про розв'язання задачі: незважаючи на те, що струм і напруга в досліджуваній гілці збігаються за напрямком, на окремих її ділянках напруги можуть виявитися протилежними за знаком.

Problem 2 (Fig. 2.1.6)

Задача 2 (рис. 2.1.6)

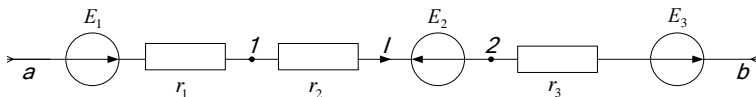


Fig. 2.1.6. Subcircuit with EMF

Рис. 2.1.6. Ділянка кола з ЕРС

It is known:

$$E_1 = 15 \text{ V}; E_2 = 28 \text{ V}; E_3 = 3 \text{ V};$$

$$r_1 = 3,8 \text{ k}\Omega; r_2 = 5,6 \text{ k}\Omega;$$

$$r_3 = 8,1 \text{ k}\Omega.$$

Calculate the differences of potentials $\varphi_a - \varphi_b = U_{ab}$ and $\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}$ at $I = 2,45 \text{ mA}$; Calculate the values of voltage U_{ab} at which the current in the branch will be equal to zero.

All necessary discussions are made by students supervised by the teacher in the course of problem solution. It is just give a numerical solution of the problem that we give below:

Відомо:

$$E_1 = 15 \text{ В}; E_2 = 28 \text{ В}; E_3 = 3$$

$$\text{В}; r_1 = 3,8 \text{ кОм}; r_2 = 5,6 \text{ кОм};$$

$$r_3 = 8,1 \text{ кОм}.$$

Розрахувати різниці потенціалів $\varphi_a - \varphi_b = U_{ab}$ і $\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}$ при $I = 2,45 \text{ mA}$; розрахувати значення напруги U_{ab} , за якої струм у гілці дорівнюватиме нулю.

Умову задачі, хід розв'язання і розв'язання задачі обговорюють студенти під керівництвом викладача. Наведемо лише числове розв'язання:

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = -E_1 + E_2 - E_3 + I(r_1 + r_2 + r_3) = -15 + 28 - 3 + 2,45(3,8 + 5,6 + 8,1) = 10 + 2,45 \cdot 17,5 = 10 + 42,8 = 52,8 \text{ V};$$

$$U_{12} = E_2 + Ir_2 = 28 + 2,45 \cdot 5,6 = 28 + 13,7 = 41,7 \text{ V};$$

$$U_{ab}|_{I=0} = \sum_a^b E = -E_1 + E_2 - E_3 = -15 + 28 - 3 = 10 \text{ V}.$$

Problem 3 (Fig. 2.1.7)

Analyse the topology of the circuit. Mark conditionally positive directions of currents and voltages in the branches and ele-

Задача 3 (рис. 2.1.7)

Проаналізувати топологію кола. Позначити умовно-додатні напрями струмів і напруг у гілках та на елементах.

ments. Write node and loop equations for the circuit.

Say, what will change in the circuit equations if the direction of EMF or the direction of one, two or three source currents changes.

Записати вузлові й контурні рівняння кола.

Зазначити, які зміни відбудуться в рівняннях кола, якщо змінити напрямок ЕРС або струму одного, двох або трьох джерел.

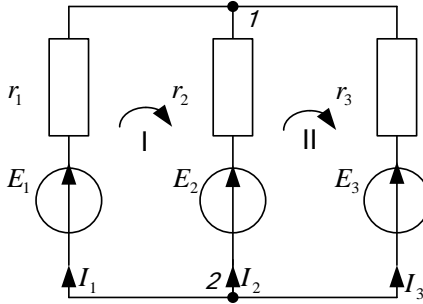


Fig. 2.1.7. Circuit diagram for problem 3
Рис. 2.1.7. Електричне коло для задачі 3

It turns out as a result of analysis that the circuit contains 2 nodes and 3 loops, 2 of which are independent, i.e. they cannot include only those branches belonging to other loops.

Having chosen the conditionally positive directions of currents in the branches and the direction of loop tracing, we write the following Kirchhoff's equations:

For node 1:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

For loop I:

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2.$$

For loop II:

$$E_2 - E_3 = I_2 r_2 - I_3 r_3.$$

У результаті аналізу з'ясується, що коло містить 2 вузли і 3 контури, з яких 2 є незалежними, тобто не можуть бути складені лише з гілок, що входять в інші контури.

Обравши умовно-додатні напрямки струмів у гілках і напрямком обходу контурів, запишемо рівняння Кірхгофа:

Для вузла 1:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

Для контуру I:

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2.$$

Для контуру II:

$$E_2 - E_3 = I_2 r_2 - I_3 r_3.$$

Note that when the direction of EMF or the direction of one, two or three source currents changes, the sign in Kirchoff's equations for the corresponding EMF or current will also change.

Problem 4 (see conditions for problem 3) (Fig. 2.1.8)

Звертаємо увагу, що під час зміни напрямку ЕРС або струму одного, двох або трьох джерел у рівняннях Кірхгофа зміняться знаки відповідних ЕРС або струмів.

Задача 4 (див. умови задачі 3) (рис. 2.1.8)

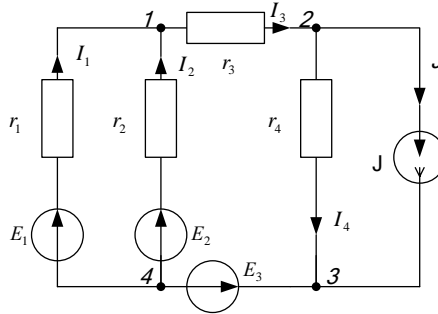


Fig. 2.1.8. Circuit diagram for problem 4
Рис. 2.1.8. Електричне коло для задачі 4

A circuit contains 3 nodes and 2 independent loops. Note that the branch, containing the source of current does not make a loop, and the terminals of the EMF source E_3 whose inner resistance equals 0 come together to one node.

Схема містить 3 вузли й 2 незалежні контури. Звернути увагу, що гілка, яка містить джерело струму, контуру не утворює, а затискачі джерела напруги E_3 , внутрішній опір якого дорівнює 0, сходяться в одному вузлі.

For node 1:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

For node 2:

$$I_3 - I_4 - J = 0.$$

For loop I:

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2.$$

For loop II:

$$E_2 - E_3 = I_2 r_2 + I_3 r_3 + I_4 r_4.$$

Для вузла 1:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Для вузла 2:

$$I_3 - I_4 - J = 0.$$

Для контуру I:

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2.$$

Для контуру II:

$$E_2 - E_3 = I_2 r_2 + I_3 r_3 + I_4 r_4.$$

Homework

Analyze the circuits (Fig. 2.1.9, Fig. 2.1.10) according to the specification of problem 3. All the elements and indices in the circuit are to be denoted by the student.

Домашнє завдання

Проаналізувати кола задач 1 та 2 (рис. 2.1.9, 2.1.10) за умовою задачі 3. Елементи та індекси на схемах студент позначає самостійно.

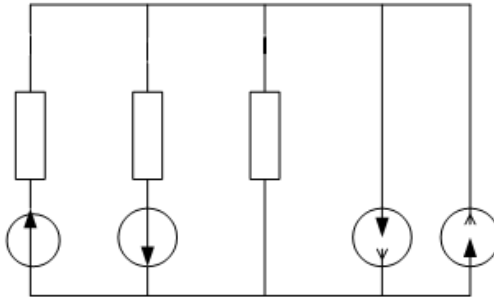


Fig. 2.1.9. Circuit diagram for problem 1 homework
Рис. 2.1.9. Електричне коло для задачі 1

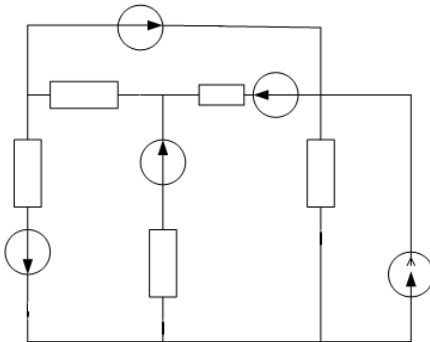


Fig. 2.1.10. Circuit diagram for problem 2 homework
Рис. 2.1.10. Електричне коло для задачі 2

Practical class 2

CALCULATION OF CIRCUITS BY THE ME- THOD OF EQUIVALENT TRANSFORMATIONS AND BY THE METHOD OF KIRCHOFF'S EQUATIONS

Aim of the class. Acquiring practical skills in application of the method of equivalent transformations and the method of Kirchoff's equations for electric circuit calculation.

Methodological recommendations

Before starting to solve the problems, it is necessary to make revision and learn the necessary material on the theory of linear electric circuits:

1. The essence of the equivalent transformation method, the peculiarities and order of calculation.

2. Basic rules of equivalent transformations of simplest passive circuits (series, parallel and mixed connections; star and delta connections).

3. Basic rules of equivalent transformations of simplest circuits with current and voltage sources (Fig. 2.2.1).

4. The rule of voltage distribution in a two-element voltage divider.

Практичне заняття 2

РОЗРАХУНОК КІЛ МЕТОДОМ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТА МЕТОДОМ РІВНЯНЬ КІРХГОФА

Мета заняття. Забезпечити набуття студентами навичок практичного застосування методів еквівалентних перетворень кола та рівнянь Кірхгофа для розрахунку електричних кіл.

Методичні рекомендації

Перед розв'язанням задач необхідно повторити та засвоїти такі питання теорії лінійних електричних кіл:

1. Суть методу еквівалентних перетворень, особливості та порядок розрахунку.

2. Основні правила еквівалентних перетворень простіших пасивних кіл (послідовне, паралельне та змішане з'єднання; з'єднання у зірку та трикутник).

3. Основні правила еквівалентних перетворень простіших кіл з джерелами напруг і струму (рис. 2.2.1).

4. Правило розподілу напруг у двохелементному розподільнику напруги.

5. The rule of current distribution in a two-element current divider.

6. The essence of Kirchoff's equations method.

7. Peculiarities and order of calculation by Kirchoff's equations method.

8. The rule of selection of independent loops and nodes.

9. Determining the number of equations made up according to Kirchoff's equations method.

5. Правило розподілу струмів у двохелементному розподільнику струму

6. Суть методу рівнянь Кірхгофа.

7. Особливості та порядок розрахунку методом рівнянь Кірхгофа.

8. Правило виділення незалежних контурів та вузлів.

9. Визначення кількості рівнянь, які складаються за методом рівнянь Кірхгофа.

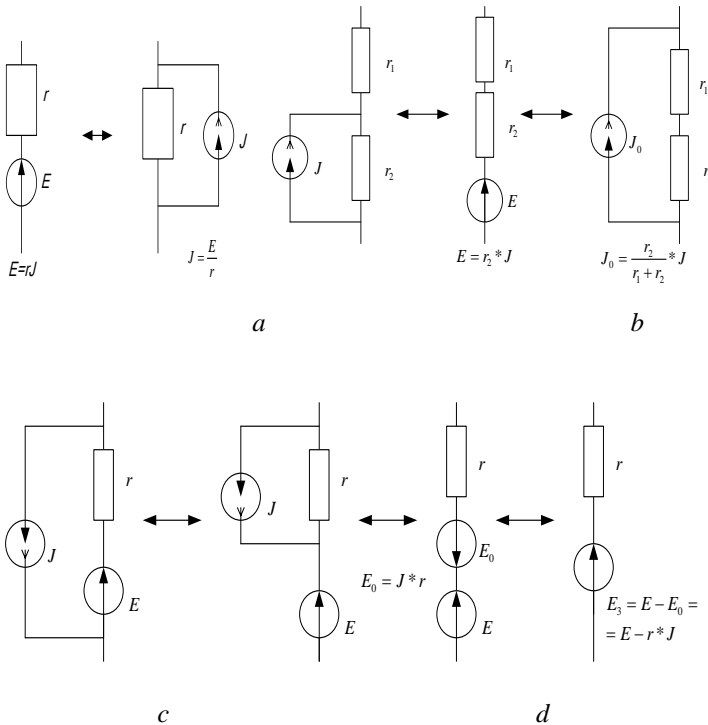


Fig. 2.2.1. Equivalent transformations of the simplest active circuits
 Рис. 2.2.1. Еквівалентні перетворення в найпростіших електричних колах

The problems should be solved in the following order:

1. Analyzing the problem situation and peculiarities of the circuit.

2. Planning the sequence of problem solution operations.

3. Solving the problem first in general, then numerically.

4. Making generalizations and summing up the results of solving the problem.

Solution of problems

Problem 1

The circuit diagram is given in Fig. 2.2.2.

Задачі слід розв'язувати у такій послідовності:

1. Аналіз умов задачі, особливостей схеми кола і завдання.

2. Складання плану і ходу розв'язання задач.

3. Розв'язання задачі в загальному вигляді і потім – у числах.

4. Узагальнення та формулювання підсумків розв'язання задачі.

Розв'язання задач

Задача 1

Дано схему електричного кола (рис. 2.2.2).

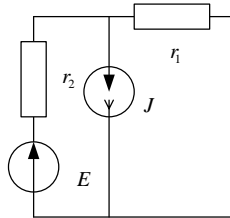


Fig. 2.2.2. The circuit diagram for problem 1

Рис. 2.2.2. Електричне коло для задачі 1

It is known

Відомо

$$r_1 = 1,2\text{k}\Omega, \quad r_2 = 2,4\text{k}\Omega; \quad J = 15\text{ mA}; \quad E = 22\text{ V}.$$

The circuit is to be replaced with an equivalent source of:

- 1) voltage,
- 2) current

and the parameters of its elements are to be determined.

Замінити коло еквівалентним джерелом:

- 1) напруги,
- 2) струму

та визначити параметри його елементів.

Solution

1. Let us make the equivalent transformations (Fig. 2.2.3).

Розв'язання

1. Виконаємо еквівалентні перетворення (рис. 2.2.3).

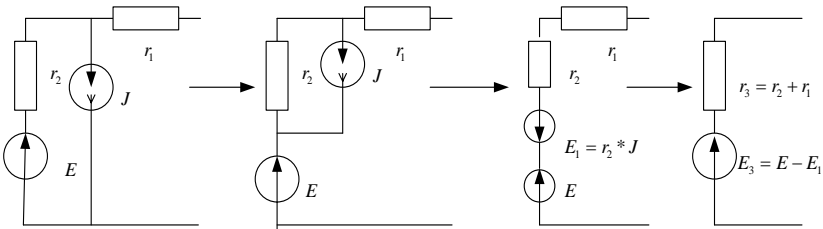


Fig. 2.2.3. Equivalent transformations of circuit diagrams
Рис. 2.2.3. Еквівалентні перетворення в електричному колі

$$r_3 = r_1 + r_2 = 1,2 + 2,4 = 3,6 \text{ k}\Omega;$$

$$E_3 = E - r_2 J_2 = 22 - 2,4 \cdot 15 = -14 \text{ V}.$$

2. Let us make the equivalent transformations (Fig. 2.2.4).

2. Виконаємо еквівалентні перетворення (рис. 2.2.4).

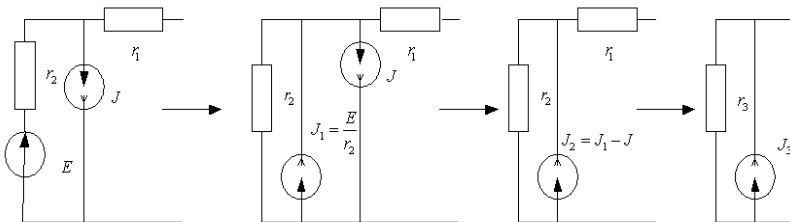


Fig. 2.2.4. Equivalent transformations of circuit diagrams
Рис. 2.2.4. Еквівалентні перетворення в електричному колі

$$r_3 = r_1 + r_2 = 1,2 + 2,4 = 3,6 \text{ k}\Omega;$$

$$J_3 = J_2 \frac{r_2}{r_1 + r_2} = (J_1 - J) \frac{r_2}{r_1 + r_2} = \left(\frac{E}{r_2} - J \right) \frac{r_2}{r_1 + r_2} = \frac{E}{r_1 + r_2} -$$

$$- J \frac{r_2}{r_1 + r_2} = \frac{22}{1,2 + 2,4} - 15 \frac{2,4}{1,2 + 2,4} = -3,84 \text{ mA}.$$

Problem 2

a) Find the current in the measuring diagonal of the bridge (Fig. 2.2.5), if the following is known:

$$r_1 = 10\Omega; r_2 = 100\Omega; r_3 = 1000\Omega; r_4 = 50\Omega;$$

$$R_n = 200\Omega; E = 6 V.$$

b) Find the current in the measuring diagonal, if $r_0 = 0\Omega$

Задача 2

a) Визначити струм I_n у вимірювальній діагоналі мосту (рис. 2.2.5), якщо відомо:

б) Визначити струм I_n у випадку, коли $r_0 = 0\Omega$.

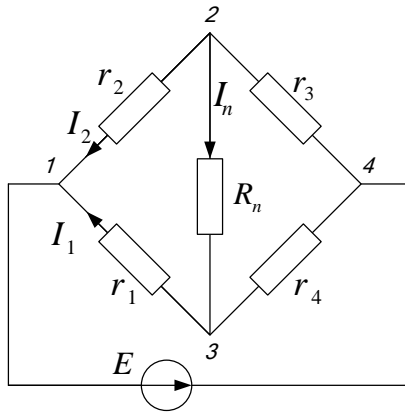


Fig. 2.2.5. The bridge diagram
Рис. 2.2.5. Електрична схема мосту

Solution

a)

1. The triangle (R_n, r_3, r_4) is transformed to the star-connection (r_5, r_6, r_7) (Fig. 2.2.6):

Розв'язання

a)

1. Перетворення трикутника (R_n, r_3, r_4) у зірку (r_5, r_6, r_7) (рис. 2.2.6):

$$r_5 = \frac{R_n r_3}{R_n + r_3 + r_4} = \frac{200 \cdot 1000}{200 + 50 + 1000} = 160\Omega;$$

$$r_6 = \frac{r_3 r_4}{R_n + r_3 + r_4} = \frac{1000 \cdot 50}{200 + 50 + 1000} = 40\Omega;$$

$$r_7 = \frac{R_n r_4}{R_n + r_3 + r_4} = \frac{200 \cdot 50}{200 + 50 + 1000} = 8 \Omega.$$

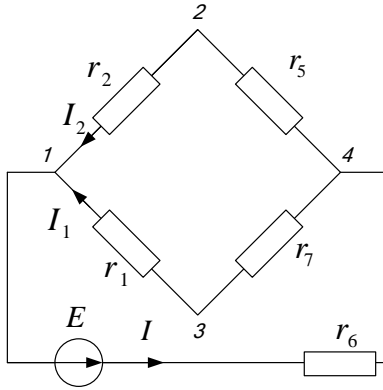


Fig. 2.2.6. Transformation into a star of bridge diagram
Рис. 2.2.6. Перетворення трикутника в зірку мостової схеми

2. The series connection of resistors is transformed (Fig. 2.2.7) 2. Перетворення послідовного з'єднання опорів (рис. 2.2.7)

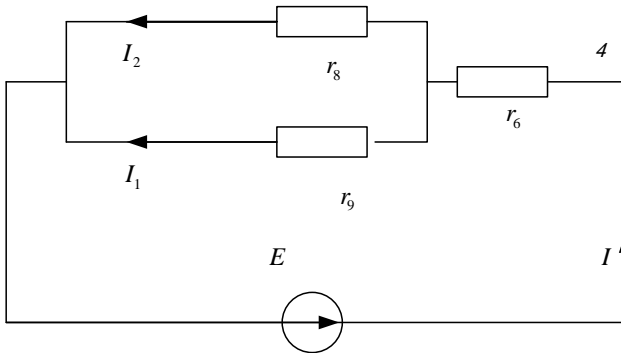


Fig. 2.2.7. Transformation of the resistances connection in series
Рис. 2.2.7. Перетворення послідовно з'єднаних резисторів

$$r_8 = r_2 + r_5 = 100 + 160 = 260 \Omega;$$

$$r_9 = r_1 + r_7 = 10 + 8 = 18 \Omega.$$

3. Transformation of mixed resistances connection (Fig. 2.2.8) 3. Перетворення змішаного з'єднання опорів (рис. 2.2.8):

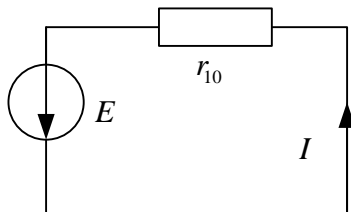


Fig. 2.2.8. Transformation of mixed resistances connection
Рис. 2.2.8. Перетворення змішаного з'єднання резисторів

$$r_{10} = \frac{r_8 r_9}{r_8 + r_9} + r_6 = \frac{260 \cdot 18}{260 + 18} + 40 = 56,8 \Omega.$$

4. Calculating the current in the diagonal containing the source of energy. 4. Розрахунок струму в діагоналі з джерелом живлення:

$$I = \frac{E}{r_{10}} = \frac{6}{56,8} = 105,6 \cdot 10^{-3} = 105,6 \text{ mA}.$$

5. Calculating the currents in the shoulders of the Wheatstone bridge: 5. Розрахунок струмів у плечах моста Уїтстона:

$$I_1 = I \frac{r_8}{r_8 + r_9} = 0,1056 \frac{260}{260 + 18} = 98,8 \text{ mA};$$

$$I_2 = I - I_1 = 105,6 - 98,8 = 6,8 \text{ mA}.$$

6. The Voltage across the measuring diagonal: 6. Напряга на вимірювальній діагоналі:

$$U_{23} = r_2 I_2 - r_1 I_1 = 100 \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 98,8 \cdot 10^{-3} = -0,308 \text{ V}.$$

7. The current in the measuring diagonal 7. Струм у вимірювальній діагоналі

$$I_B = \frac{U_{23}}{R_n} = -\frac{0,308}{200} = -1,54 \cdot 10^{-3} = -1,54 \text{ mA}.$$

b) In this case, we use the equivalent generator theorem. б) У цьому випадку використаємо теорему про еквівалент-

Branch with the unknown current disconnects.

1. Define the open circuit voltage between breaking points (between nodes 2 and 3 circuit shown in Fig. 2.2.6, for which in this case,). $r_5 = r_3$, $r_7 = r_4$, $r_6 = 0$).

To do this, execute calculations similar items 2–6 a) solution to this problem

$$r_{\text{All}} = \frac{(r_1 + r_4)(r_2 + r_3)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} = \frac{(10 + 50)(100 + 1000)}{10 + 100 + 1000 + 50} = 56,9 \Omega;$$

$$I = \frac{E}{r_{\text{All}}} = \frac{6}{56,9} = 10545 \cdot 10^{-3} = 105,45 \text{ mA};$$

$$I_1 = I \frac{r_2 + r_3}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} = 0,10545 \cdot \frac{1100}{1160} = 100 \text{ mA};$$

$$I_2 = I - I_1 = 105,45 - 100 = 5,45 \text{ mA};$$

$$U_{23} = r_2 I_2 - r_1 I_1 = 100 \cdot 5,45 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = -0,455 \text{ V}.$$

2. Define the equivalent resistance between breaking points – internal resistance of the equivalent generator. In this case, джерело source voltage E is shorted.

$$R_{\text{in}} = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3} + \frac{r_1 r_4}{r_1 + r_4} = \frac{100 \cdot 1000}{100 + 1000} + \frac{10 \cdot 50}{10 + 50} = 99,24 \Omega.$$

3. Define the unknown current

$$I_B = \frac{U_{23}}{R_{\text{in}} + R_n} = -\frac{0,455}{99,24 + 200} = -1,52 \cdot 10^{-3} = -1,52 \text{ mA}.$$

Problem 3

The circuit diagram is given in Fig. 2.2.9.

ний генератор. Гілка з невідомим струмом розмикається.

1. Визначимо напругу холостого ходу між точками розриву (між вузлами 2 та 3 схеми, зображеної на рис. 2.2.6, для якої у цьому випадку $r_5 = r_3$, $r_7 = r_4$, $r_6 = 0$).

Для цього виконаємо розрахунки, аналогічні пп. 2–6 розв'язання а) цієї задачі

2. Визначимо еквівалентний опір між точками розриву – внутрішній опір еквівалентного генератора. При цьому джерело напруги E закорочується.

3. Визначимо невідомий струм

Задача 3

Дано схему електричного кола (рис. 2.2.9).

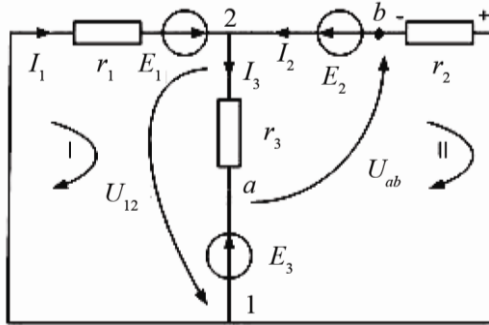


Fig. 2.2.9. The circuit diagram for problem 3
Рис. 2.2.9. Електричне коло для задачі 3

It is known

Відомо

$$r_1 = r_2 = 2 \text{ k}\Omega; r_3 = 1 \text{ k}\Omega; E_1 = 14 \text{ V}; E_2 = 8 \text{ V}; E_3 = 12 \text{ V}.$$

To find the currents in all branches and potential differences between points a and b ; 2 and 1 .

Знайти струми у всіх гілках та різницю потенціалів між точками a і b ; 2 і 1 .

Solution

Розв'язання

1. Analyzing the topology of the circuit: the number of nodes: $q=2$, of which the independent nodes: $q-1=1$; the number of independent loops = the number of chords = 2.

1. Аналіз топології кола:
– кількість вузлів $q=2$, з них незалежних $q-1=1$;

– кількість незалежних контурів відповідає кількості хорд і дорівнює 2.

2. Choosing the conditionally positive directions of currents in the branches. Explaining the meaning of these directions and their connection with the signs in the equations and solutions obtained.

2. Вибір умовно-додатних напрямів струмів у гілках; пояснити значення цих напрямків та їх зв'язок зі знаками у рівняннях та отриманих розв'язках.

3. For node 2 the equation, according to Kirchoff's law for currents, is:

3. Рівняння за законом Кірхгофа для струмів (для вузла 2):

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (2.2.1)$$

4. For loops I and II the equations, according to Kirchhoff's law for voltages, are:

$$r_1 I_1 + r_3 I_3 - E_1 + E_3 = 0; \quad (2.2.2)$$

$$-r_3 I_3 - r_2 I_2 - E_3 + E_2 = 0. \quad (2.2.3)$$

5. The system of equations (2.2.1) – (2.2.3) is solved by the method of substitution.

Substituting (2.2.1) to (2.2.2) and (2.2.3), we get:

$$\begin{aligned} (r_1 + r_3)I_1 + r_3 I_2 &= E_1 - E_3; \\ -r_3 I_1 - (r_2 + r_3)I_2 &= E_3 - E_2. \end{aligned} \quad (2.2.4)$$

Hence, using Cramer's formulas, it follows:

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta},$$

where Δ is the determinant of the system of equations; Δ_k is the determinant obtained from Δ by replacing the k -th column with the right part of equation (2.2.4).

4. Рівняння за законом Кірхгофа для напруг для контурів I і II:

5. Розв'язання системи рівнянь (2.2.1)–(2.2.3) методом підстановок.

Підставляючи рівняння (2.2.1) у (2.2.2) і (2.2.3), отримуємо:

Звідси за формулами Крамера

де Δ – визначник системи рівнянь; Δ_k – визначник, який отримується з Δ заміною k -го стовпця стовпцем ЕРС (2.2.4).

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_1 + r_3 & r_3 \\ -r_3 & -(r_2 + r_3) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3 & 1 \\ -1 & -3 \end{vmatrix} = -8(k\Omega)^2;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} E_1 - E_3 & r_3 \\ E_3 - E_2 & -(r_2 + r_3) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 4 & -3 \end{vmatrix} = -10 \text{ V} * k\Omega;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} r_1 + r_2 & E_1 - E_3 \\ -r_3 & E_3 - E_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ -1 & 4 \end{vmatrix} = 14 \text{ V} \cdot \text{k}\Omega;$$

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-10}{-8} = 1,25 \text{ mA};$$

$$I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{14}{-8} = -1,75 \text{ mA};$$

$$I_3 = I_1 + I_2 = 1,25 - 1,75 = -0,5 \text{ mA}.$$

Discussing the physical meaning of the signs obtained in solving the problem.

6. Proving the solution results using the power balance equation:

$$\delta = \frac{\sum_k P_{\text{source},k} - \sum_q P_{\text{consumer},q}}{\sum P_{\text{source},k}} \cdot 100;$$

$$\sum P_{\text{source}} = I_1 E_1 + I_2 E_2 - I_3 E_3 = 1,25 \cdot 14 - 1,75 \cdot 8 + 0,5 \cdot 12 = 9,5 \text{ W};$$

$$\sum P_{\text{consumer}} = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2 = 2 \cdot 1,25^2 + 2 \cdot 1,75^2 + 1 \cdot 0,5^2 = 9,49 \text{ W};$$

$$\delta = \frac{9,5 - 9,49}{9,5} \cdot 100 = 0,11\%.$$

7. The potential difference U_{ab} according to Ohm's law:

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = E_2 - I_3 r_3 = 8 + 1 \cdot 0,5 = 8,5 \text{ V}.$$

8. The potential difference U_{21} according to Ohm's law:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = U_{21} = r_3 I_3 + E_3 = 1 \cdot (-0,5) + 12 = 11,5 \text{ V}.$$

Homework

Problem 4

The circuit diagram is given in Fig. 2.2.10.

Розглянути фізичний зміст отриманих у розв'язках знаків.

6. Перевірка правильності розв'язання за допомогою рівняння балансу потужностей:

7. Різниця потенціалів між точками a і b :

8. Різниця потенціалів між точками 2 і 1:

Домашнє завдання

Задача 4

Дано схему електричного кола (рис. 2.2.10).

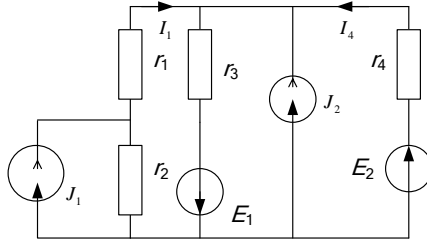


Fig. 2.2.10. The circuit diagram for problem 4
Рис. 2.2.10. Електричне коло для задачі 4

Using the method of equivalent transformations, the currents I_1 and I_4 are found for:

$$r_1 = 2,5 \text{ k}\Omega; r_2 = 1,2 \text{ k}\Omega; r_3 = 5,1 \text{ k}\Omega; r_4 = 11 \text{ k}\Omega;$$

$$J_1 = 10 \text{ mA}; J_2 = 21 \text{ mA}; E_1 = 50 \text{ V}; E_2 = 87 \text{ V}.$$

Problem 5 (a task of the increased complication)

There is a diagram of electric circuit (Fig. 2.2.11).

Задача 5 (задача підвищеної складності)

Дано схему електричного кола (рис. 2.2.11).

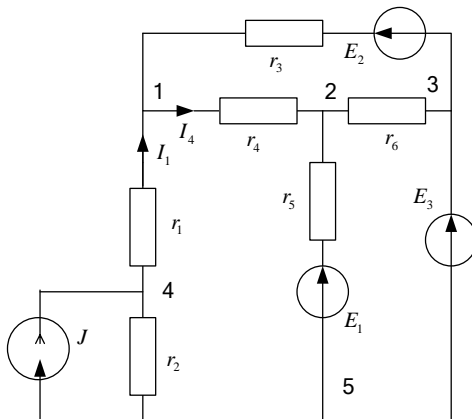


Fig. 2.2.11. The circuit diagram for problem 5
Рис. 2.2.11. Електричне коло для задачі 5

$$r_1 = 2,5 \text{ k}\Omega; r_2 = 1,2 \text{ k}\Omega; r_3 = r_6 = 5 \text{ k}\Omega; r_4 = r_5 = 1 \text{ k}\Omega;$$

$$J = 10 \text{ mA}; E_1 = 50 \text{ V}; E_2 = 87 \text{ V}; E_3 = 75 \text{ V}.$$

To find a current in resistors r_1 , r_4 . For the solution of this problem it is necessary first to do equivalent transformations allowing circuit simplification without losing branches with unknown currents. Then, the method of Kirchhoff's equations is applied: equivalent replacement of the parallel connection of two branches connecting the sources of EMF (Fig. 2.2.12).

Знайти струм в опорах r_1 , r_4 . Для розв'язання цієї задачі необхідно спочатку зробити еквівалентні перетворення, які спрощують коло, але не втрачають гілки з невідомими струмами, а потім застосувати метод рівнянь Кірхгофа: виконати еквівалентну заміну паралельного з'єднання двох гілок з джерелами ЕРС (рис. 2.2.12).

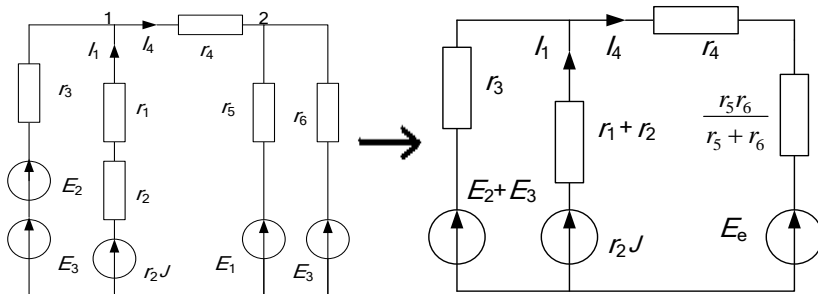


Fig. 2.2.12. The diagram of equivalent replacement of parallel connection of two branches with the sources of EMF

Рис. 2.2.12. Еквівалентне перетворення паралельного з'єднання двох гілок з джерелами ЕРС

Practical class 3

CALCULATION OF CIRCUITS BY THE METHOD OF LOOP CURRENTS AND THE NODE-VOLTAGE METHOD

Aim of the class. Students' acquiring practical skills in application of the method of loop currents and the node-voltage method for circuit calculation.

Практичне заняття 3

РОЗРАХУНОК КІЛ МЕТОДОМ КОНТУРНИХ СТРУМІВ ТА МЕТОДОМ ВУЗЛОВИХ НАПРУГ

Мета заняття. Забезпечити набуття студентами уміння практичного застосування методів контурних струмів та вузлових напруг для розрахунку кіл.

Methodological recommendations

Before starting to solve the problems, it is necessary to make revision and learn the necessary material on the theory of linear electric circuits:

1. Independent loops of a circuit. Loop currents, resistances and EMF's. Choosing the loop current direction. Systems of loop equations in the matrix form; their formulation and solution. A matrix of loop resistances; taking account of current sources in loop EMFs. Determination of currents in the branches of a circuit in terms of loop currents.

2. Independent nodes of a circuit. Node voltages, currents and conductances. Choosing the node voltage directions. Systems of node equations in the matrix form, their formulation and solution. A matrix of node conductances. Determination of node currents. Determination of branch currents in terms of node voltages.

The problems are to be solved in the following order:

1. Analyzing the problem situation, the peculiarities of the circuit and those of the problem.

2. Planning the sequence of problem solution operations.

3. Solving the problem first in general, then numerically.

Методичні рекомендації

Перед розв'язанням задач необхідно повторити та засвоїти такі питання теорії лінійних електричних кіл:

1. Незалежні контури кола. Контурні струми, опори та ЕРС. Вибір напрямків контурних струмів. Система контурних рівнянь у матричній формі, її складання та розв'язання. Матриця контурних опорів, урахування джерел струму в контурних ЕРС. Визначення струмів у гілках кола через контурні струми.

2. Незалежні вузли кола. Вузлові напруги, провідності та струми. Вибір напрямків вузлових напруг. Система вузлових рівнянь у матричній формі, її складання та розв'язання. Матриця вузлових провідностей. Визначення вузлових струмів. Визначення струмів у гілках кола через вузлові напруги.

Задачі слід розв'язувати у такій послідовності:

1. Аналіз умов задачі, особливостей схеми кола.

2. Складання плану і ходу розв'язання задач.

3. Розв'язання задачі спочатку в загальному вигляді, потім – у числовому вираженні.

4. Making generalizations and summing up the results of solving the problem.

4. Узагальнення та формулювання підсумків розв'язання задачі.

Solving problems

Розв'язання задач

Problem 1

Задача 1

Given an electric circuit (Fig. 2.3.1).

Дано схему електричного кола (рис. 2.3.1).

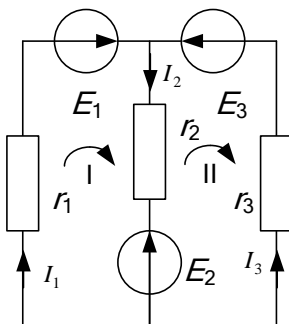


Fig. 2.3.1. The circuit diagram for problem 1

Рис. 2.3.1. Електричне коло для задачі 1

To find loop resistances and loop EMF. To work out the system of loop equations.

Знайти контурні опори та контурні ЕРС. Скласти систему контурних рівнянь.

The problem gets untied in general. Making of solution:

Задача розв'язується в загальному вигляді. Хід розв'язання:

1. Choosing the conditionally positive directions of currents in branches I_1 , I_2 та I_3 .

1. Вибір умовно-додатних напрямків струмів у гілках I_1 , I_2 та I_3 .

2. Determining the number of independent loops (for example I and II).

2. Вибір незалежних контурів, наприклад I і II.

3. Choosing the directions of loop currents (the directions of loop currents are taken the same for both loops).

3. Вибір напрямків контурних струмів (напрямки контурних струмів обираються однаковими для обох контурів).

4. Formulation of loop equations and writing them in the matrix form:

4. Складання контурних рівнянь. Перехід до матричної форми запису рівнянь:

$$\begin{vmatrix} r_1 + r_2 & -r_2 \\ -r_2 & r_2 + r_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{\text{I}} \\ I_{\text{II}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E_1 - E_2 \\ E_2 - E_3 \end{vmatrix};$$

$$RI = E,$$

where R — a matrix of loop resistances, I — a column matrix of loop currents, E — a column matrix of loop EMFs.

де R — матриця контурних опорів; I — матриця-стовпець контурних струмів; E — матриця-стовпець контурних ЕРС.

$$R = \begin{vmatrix} r_1 + r_2 & -r_2 \\ -r_2 & r_2 + r_3 \end{vmatrix};$$

$$I = \begin{vmatrix} I_{\text{I}} \\ I_{\text{II}} \end{vmatrix};$$

$$E = \begin{vmatrix} E_1 - E_2 \\ E_2 - E_3 \end{vmatrix}.$$

5. Solving the equations.

5. Розв'язання рівнянь.

$$I_{\text{I}} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; I_{\text{II}} = \frac{\Delta_2}{\Delta};$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_1 + r_2 & -r_2 \\ -r_2 & r_2 + r_3 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} E_1 - E_2 & -r_2 \\ E_2 - E_3 & r_2 + r_3 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} r_1 + r_2 & E_1 - E_2 \\ -r_2 & E_2 - E_3 \end{vmatrix}.$$

6. Representation of branch currents in terms of loop currents:

$$I_1 = I_I, I_2 = I_I - I_{II}, I_3 = -I_{II} .$$

Problem 2

There's a diagram of electric circuit (Fig. 2.3.2).

Задача 2

Дано схему електричного кола (рис. 2.3.2).

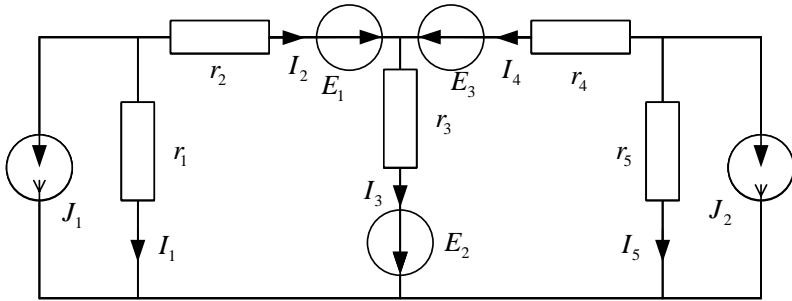


Fig. 2.3.2. The circuit diagram for problem 2
Рис. 2.3.2. Електричне коло для задачі 2

It is known

Відомо

$$r_1 = r_2 = 3 \text{ k}\Omega; r_3 = 1,5 \text{ k}\Omega; r_4 = r_5 = 2,4 \text{ k}\Omega; E_1 = 100 \text{ V};$$

$$E_2 = 60 \text{ V}; E_3 = 80 \text{ V}; J_1 = J_2 = 10 \text{ mA}.$$

To find currents in the branches by the method of loop currents.

Знайти струми у гілках кола методом контурних струмів.

Analyzing the problem situation.

Аналіз умови задачі.

The circuit has two branches, each containing a current source. These branches do not form loops, hence the number of independent loops in the circuit is 2.

Коло має дві гілки з джерелами струму. Ці гілки не утворюють контурів, тому кількість незалежних контурів у колі дорівнює 2.

Choose the conditionally positive directions of currents in the branches of the initial circuit (Fig. 2.3.2).

Оберемо умовно-додатні напрямки струмів у гілках первинної схеми (рис. 2.3.2).

Convert the current sources into their equivalent sources of EMF (Fig. 2.3.3).

Перетворимо джерела струму в еквівалентні джерела ЕРС (рис. 2.3.3).

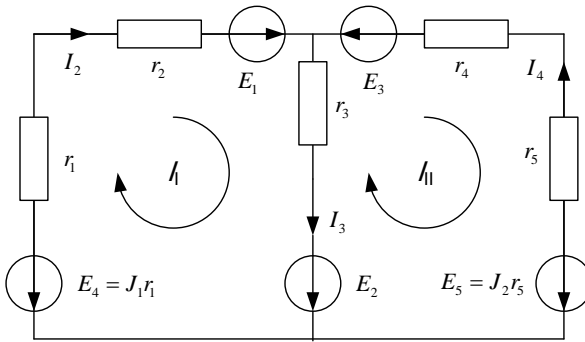


Fig. 2.3.3. Convert the current sources into sources of EMF
Рис. 2.3.3. Перетворення джерел струму в джерела ЕРС

Now it becomes obvious that the given circuit has two loops with two loop currents I_I and I_{II} . The sources of EMF and resistances connected in series can be united, although it is not necessary.

Тепер очевидно, що задане коло має два контури з контурними струмами I_I та I_{II} . Послідовно з'єднані джерела ЕРС і опори можна об'єднати, але це не обов'язково.

Analyzing the solution procedure.

Аналіз ходу розв'язання задачі.

Choosing the conditionally positive directions of currents in the branches (for example, as shown on the diagram).

Вибір умовно-додатних напрямків струмів у гілках (наприклад, так, як показано на схемі).

Choosing the directions of loop currents and showing them with arrows. Note that the directions of loop currents in all the loops must be taken the same.

Вибір та позначення напрямків контурних струмів. Напрямки контурних струмів у всіх контурах треба вибирати однаковими.

Representing the currents in all the branches in terms of loop currents.

Виразення струмів у всіх гілках через контурні струми.

Formulation of loop equations.

Writing the equations in the matrix form.

Solving the equations to find the loop currents.

Calculation of currents in the branches.

Proving the solution results using the power balance equation.

General solution of the problem.

In accordance with the conditionally positive directions chosen for branch currents and loop currents, the currents in the branches are determined as follows:

$$I_2 = I_1; \quad I_3 = I_1 - I_{II}; \quad I_4 = -I_{II}.$$

As the solution of problem 1 shows, setting up loop equations presents no difficulty, so we can write them in the matrix form right away:

$$\begin{vmatrix} r_1 + r_2 + r_3 & -r_3 \\ -r_3 & r_3 + r_4 + r_5 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} I_I \\ I_{II} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -J_1 r_1 + E_1 + E_2 \\ -E_2 - E_3 + J_2 r_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E_I \\ E_{II} \end{vmatrix},$$

where

$$E_I = -J_1 r_1 + E_1 + E_2; \quad E_{II} = -E_2 - E_3 + J_2 r_5.$$

System solution (after Kramer):

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_1 + r_2 + r_3 & -r_3 \\ -r_3 & r_3 + r_4 + r_5 \end{vmatrix};$$

Складання контурних рівнянь і їх запис у матричній формі. Розв'язання рівнянь – визначення контурних струмів. Розрахунок струмів у гілках кола. Перевірка правильності розв'язку за допомогою рівняння балансу потужностей.

Розв'язання задачі в загальному вигляді

Відповідно до вибраних умовно-додатних напрямків струмів у гілках і контурних струмів, струми у гілках (рис. 2.3.3) схеми визначаються таким чином:

Досвід розв'язання задачі 1 показує, що складання контурних рівнянь не викликає труднощів, тоді можна одразу записувати їх в матричній формі:

Розв'язання системи (за Крамером):

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} E_I & -r_3 \\ E_{II} & r_3 + r_4 + r_5 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} r_1 + r_2 + r_3 & E_I \\ -r_3 & E_{II} \end{vmatrix};$$

$$I_I = \frac{\Delta_1}{\Delta}; I_{II} = \frac{\Delta_2}{\Delta}.$$

Numerical solution of the problem:

Розв'язання задачі у числових значеннях:

$$E_I = 100 + 60 - 10 \cdot 3 = 130 \text{ V};$$

$$E_{II} = 10 \cdot 2,4 - 60 - 80 = -116 \text{ V};$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 7,5 & -1,5 \\ -1,5 & 6,3 \end{vmatrix} = 47,25 - 2,25 = 45 (\text{k}\Omega)^2;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 130 & -1,5 \\ -116 & 6,3 \end{vmatrix} = 819 - 174 = 675 (\text{V} \cdot \text{k}\Omega);$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 7,5 & 130 \\ -1,5 & -116 \end{vmatrix} = -870 + 195 = -675 (\text{V} \cdot \text{k}\Omega);$$

$$I_I = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{645}{45} = 14,3 \text{ mA}; \quad I_{II} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = -\frac{675}{45} = -15 \text{ mA};$$

$$I_2 = 14,3 \text{ mA}; \quad I_3 = 14,3 + 15 = 29,3 \text{ mA}; \quad I_4 = 15 \text{ mA}.$$

Branch currents in the circuit (Fig. 2.3.2):

Струми у гілках кола (рис. 2.3.2) становлять:

$$I_1 = -J_1 - I_2 = -24,3 \text{ mA}; \quad I_2 = 14,3 \text{ mA}; \quad I_3 = 29,3 \text{ mA};$$

$$I_4 = 15 \text{ mA}; \quad I_5 = -J_2 - I_4 = -25 \text{ mA}.$$

Proving the solution results using the power balance equation:

Перевірка правильності розв'язання за допомогою рівняння балансу потужностей:

$$\delta = \frac{\sum P_{\text{source}} - \sum P_{\text{consumer}}}{\sum P_{\text{source}}} \cdot 100 ;$$

$$\sum P_{\text{source}} = E_1 I_2 + E_2 I_3 + E_3 I_4 - J_1 I_1 r_1 - J_2 I_5 r_5 = 100 \cdot 14,3 + 60 \cdot 29,3 + 80 \cdot 15 + 10 \cdot 24,3 \cdot 3 + 10 \cdot 25 \cdot 2,4 = 5717 \text{ mVA};$$

$$\sum P_{\text{consumer}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_3^2 r_3 + I_4^2 r_4 + I_5^2 r_5 = 24,3^2 \cdot 3 + 14,3^2 \cdot 3 + 29,3^2 \cdot 1,5 + 15^2 \cdot 2,4 + 25^2 \cdot 2,4 = 5713 \text{ mVA};$$

$$\delta = \frac{5717 - 5713}{5717} \cdot 100 = 0,07\%.$$

Problem 3

There's a diagram of electric circuit (Fig. 2.3.4).

Задача 3

Дано схему електричного кола (рис. 2.3.4).

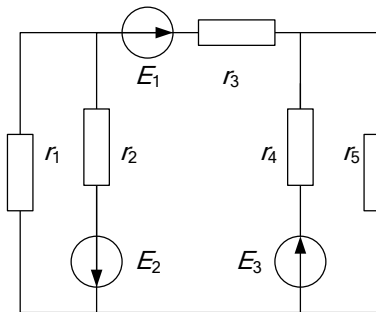


Fig. 2.3.4. The circuit diagram for problem 3

Рис. 2.3.4. Електричне коло для задачі 3

To find node conductances and node currents. To work out node equations system.

We get a general solution of the problem.

Знайти вузлові провідності та вузлові струми. Скласти систему вузлових рівнянь.

Задача розв'язується в загальному вигляді.

Problem 4

There's a diagram of electric circuit (Fig. 2.3.5).

It is known

$$r_1 = r_2 = 3 \text{ k}\Omega; r_3 = r_4 = 5,1 \text{ k}\Omega; r_5 = 8,2 \text{ k}\Omega; E_1 = 10 \text{ V};$$

$$E_2 = 14 \text{ V}; J_1 = 2 \text{ mA}; J_2 = 3 \text{ mA}.$$

Задача 4

Дано схему електричного кола (рис. 2.3.5).

Відомо

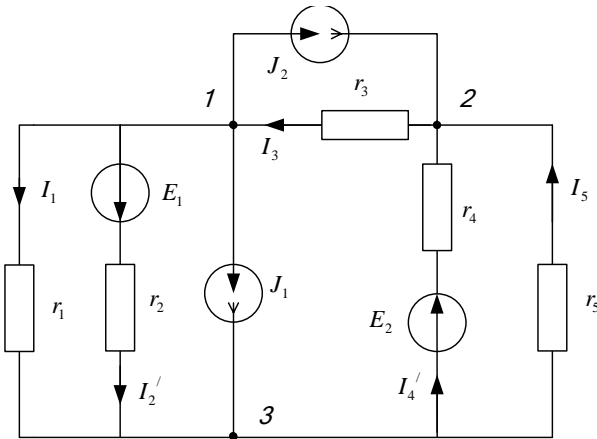


Fig. 2.3.5. The circuit diagram for problem 4

Рис. 2.3.5. Електричне коло для задачі 4

To find currents in the branches by node voltages method.

Analyzing the problem situation

The circuit has three independent loops (branches with the current sources do not form loops), and calculation of currents in it by the method of loop currents would require solution of a system of equations with three unknown variables. But the circuit has only two independent nodes, so a calculation using the node-voltage method would be easier.

Знайти струми у гілках кола методом вузлових напруг.

Аналіз умови задачі

Коло має три незалежні контури (гілки з джерелами струму контурів не утворюють) і для розрахунку його методом контурних струмів потрібно розв'язати систему рівнянь з трьома невідомими. Але незалежних вузлів у колі всього два, тому розрахунок її методом вузлових напруг виявляється більш простим.

To form node equations, it is necessary to convert the sources of EPC to their equivalent sources of current. As the solution of the previous problems shows, we can choose between the general and numerical variants of problem solution.

Analyzing the solution procedure. Choosing the base node; choosing the conditionally positive direction of currents in the branches; choosing the direction of node voltages.

Formulation of node equations (in groups where this question is developed well enough, it can be omitted).

Writing the node equations in the matrix form.

Solving the system of equations to find the node voltages.

Calculation of currents in the branches of the circuit in terms of node voltages.

Proving the solution results using the power balance equation.

General solution of the problem. Convert the sources of EMF to their equivalent current sources (Fig. 2.3.6):

Для складання вузлових рівнянь слід перетворити джерела ЕРС в еквівалентні джерела струму. З досвіду розв'язання попередніх задач можна з'ясувати, чи доцільно це виконувати в загальному вигляді і в числах.

Аналіз ходу розв'язання задачі. Вибір базового вузла; вибір умовно-додатних напрямків струмів у гілках; вибір напрямку вузлових напруг.

Складання вузлових рівнянь (якщо питання достатньо відпрацьовано, його можна випустити).

Запис вузлових рівнянь у матричній формі.

Розв'язання системи рівнянь – визначення вузлових напруг.

Розрахунок струмів у гілках кола через вузлові напруги.

Перевірка правильності розв'язання за допомогою рівняння балансу потужностей.

Розв'язання задачі в загальному вигляді. Перетворимо джерела ЕРС в еквівалентні джерела струму (рис. 2.3.6):

$$J_3 = \frac{E_1}{r_2}; J_4 = \frac{E_2}{r_4}.$$

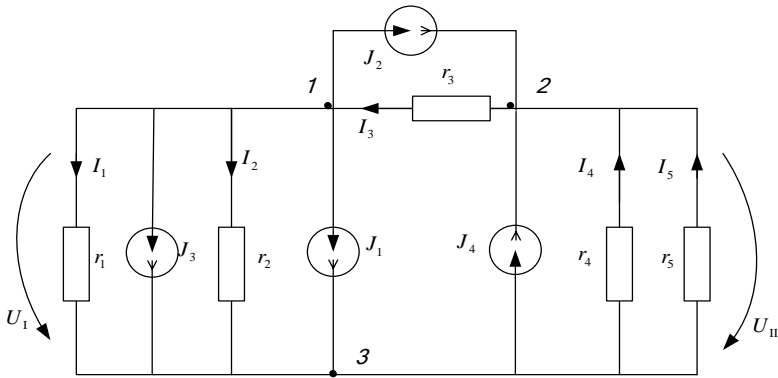


Fig. 2.3.6. The circuit diagram
Рис. 2.3.6. Електричне коло

Choose the conditionally positive directions of currents in the branches and node voltages for the initial and transformed circuits (for example, as shown in Fig. 2.3.5, 2.3.6).

Direct the node voltages to base node 3.

Make up node equations:

$$U_I(g_1 + g_2 + g_3) - U_{II}g_3 = -J_3 - J_1 - J_2;$$

$$-U_Ig_3 + U_{II}(g_4 + g_5 + g_3) = J_2 + J_4.$$

Write the node equations in the matrix form:

$$\begin{vmatrix} g_1 + g_2 + g_3 & -g_3 \\ -g_3 & g_3 + g_4 + g_5 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} U_I \\ U_{II} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -J_3 - J_1 - J_2 \\ J_2 + J_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} J_1 \\ J_{II} \end{vmatrix}.$$

Solve the system by the matrix method. For this purpose we will find the inverse matrix of conductances:

Оберемо умовно-додатні напрямки струмів у гілках та вузлових напруг первинної та перетвореної схем (наприклад, як показано на рис. 2.3.5, 2.3.6).

Вузлові напруги напрямимо до базового вузла 3.

Складасмо вузлові рівняння:

Запис вузлових рівнянь у матричній формі:

Розв'яжемо систему матричним способом. Для цього знайдемо обернену матрицю провідностей:

$$\|G\|^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} \end{vmatrix}.$$

The node voltages will be found as follows: Вузлові напруги знаходимо у вигляді

$$U_I = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} J_I + \frac{\Delta_{12}}{\Delta} J_{II};$$

$$U_{II} = \frac{\Delta_{21}}{\Delta} J_I + \frac{\Delta_{22}}{\Delta} J_{II}.$$

where J_I and J_{II} – node currents in nodes I and 2 . де J_I та J_{II} – вузлові струми вузлів I і 2 .

Express the currents in the branches through in terms of node voltages: Виразимо струми у гілках через вузлові напруги:

$$I_1 = U_I g_1; \quad U_I + E_1 = I_2' r_2; \quad I_3 = (U_{II} - U_I) g_3;$$

$$U_{II} - E_2 = I_4' r_4; \quad I_5 = -U_{II} g_5.$$

Numerical solution of problem. Розв'язання задачі у числових значеннях. Вузлові струми

The node currents are:

$$J_I = -\frac{E_2}{r_2} - J_1 - J_2 = -\frac{10}{3} - 2 - 3 = -8,33 \text{ mA};$$

$$J_{II} = J_2 + \frac{E_2}{r_4} = 3 + \frac{14}{5,1} = 3 + 2,75 = 5,75 \text{ mA}.$$

The system of equations in the matrix form: Система рівнянь у матричній формі:

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{5,1} & -\frac{1}{5,1} \\ -\frac{1}{5,1} & -\frac{1}{5,1} + \frac{1}{5,1} + \frac{1}{8,2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} U_I \\ U_{II} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -8,33 \\ 5,75 \end{vmatrix};$$

$$\begin{vmatrix} 0,862 & -0,196 \\ -0,196 & 0,514 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} U_I \\ U_{II} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -8,33 \\ 5,75 \end{vmatrix}.$$

Finding the inverse matrix for the case of a two-element matrix of conductances is very simple:

Знаходження оберненої матриці провідностей у випадку двоелементної матриці дуже просте:

$$\|g\|^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 0,514 & 0,196 \\ 0,196 & 0,862 \end{vmatrix} = \frac{1}{0,405} \begin{vmatrix} 0,514 & 0,196 \\ 0,196 & 0,862 \end{vmatrix}.$$

Thus, the node voltages will be found as:

Отже, вузлові напруги знаходимо як

$$U_I = \frac{1}{0,405} [0,514(-8,33) + 0,196 \cdot 5,75] = -7,78 \text{ V};$$

$$U_{II} = \frac{1}{0,405} [0,196(-8,33) + 0,862 \cdot 5,75] = 8,21 \text{ V}.$$

The currents in the circuit branches (Fig. 2.3.5) are:

Струми у гілках кола (рис. 2.3.5):

$$I_1 = -\frac{7,78}{3} = -2,59 \text{ mA}; \quad I_2 = \frac{-7,78 + 10}{3} = 0,74 \text{ mA};$$

$$I_3 = \frac{8,21 + 7,78}{5,1} = 3,13 \text{ mA}; \quad I_4 = \frac{-8,21 + 14}{5,1} = 1,14 \text{ mA};$$

$$I_5 = -\frac{8,21}{8,2} = -1 \text{ mA}.$$

The solution results are proved using the power balance equation:

Перевірка правильності розв'язання за допомогою рівняння балансу потужностей:

$$\delta = \frac{\sum_k P_{\text{source } k} - \sum_q P_{\text{consumer } q}}{\sum P_{\text{source } k}} \cdot 100,$$

where

де

$$\sum P_{\text{source}} = E_1 I_2' + E_2 I_4' - J_1 I_1 r_1 + J_2 I_3 r_3 = 10 \cdot 0,74 + 14 \cdot 1,14 - 2 \cdot 2,59 \cdot 3 + 3 \cdot 3,13 \cdot 5,1 = 86,79 \text{ mVA};$$

$$\sum P_{\text{consumer}} = I_1^2 r_1 + (I_2')^2 r_2 + I_3^2 r_3 + (I_4')^2 r_4 + I_5^2 r_5 = 2,59^2 \cdot 3 + 0,74^2 \cdot 3 + 3,13^2 \cdot 5,1 + 1,14^2 \cdot 5,1 + 1^2 \cdot 8,2 = 86,56 \text{ mVA};$$

$$\delta = \frac{\sum P_{\text{source}} - \sum P_{\text{consumer}}}{\sum P_{\text{source}}} \cdot 100 = 0,266 \%$$

Homework

Solve problem 2 by the node-voltage method, and problem 4 – by the method of loop currents.

Домашнє завдання

Розв'язати задачу 2 методом вузлових напруг, а задачу 4 – методом контурних струмів.

Practical class 4

CALCULATION OF SIMPLE HARMONIC CURRENT CIRCUITS

Aim of the class. Acquiring practical skills in application of the complex amplitude method for calculation of simple harmonic current circuits.

Methodological recommendations

Before starting to solve the problems, it is necessary to make revision and learn the necessary material on the theory of linear electric circuits:

Практичне заняття 4

РОЗРАХУНОК ПРОСТИХ КІЛ ГАРМОНІЧНОГО СТРУМУ

Мета заняття. Забезпечити набуття студентами умінь практичного застосування методу комплексних амплітуд для розрахунку простих кіл гармонічного струму.

Методичні рекомендації

Перед розв'язанням задач необхідно повторити та засвоїти такі питання теорії лінійних електричних кіл:

1. Instantaneous and complex instantaneous values; complex amplitude of harmonic current and voltage. Transition from the original to its image and vice versa. Complex impedance and admittance, their components and relation between them. Ohm's and Kirchhoff's laws in the complex form. Active, reactive, total and complex power. Time and vector diagrams. Counting the initial phases and phase shifts on time and vector diagrams.

2. A harmonic current circuit with one reactive element. Active (ohmic) resistance, inductive and capacitive reactances. Harmonic current circuits with series and parallel connection of a resistor and a reactive element (inductor or capacitor). The concept of complex amplitude method.

The problems are to be solved in the following order:

1. Analyzing the problem situation, the peculiarities of the circuit and those of the problem.

2. Planning the sequence of problem solution operations.

3. Solving the problem first in general, then numerically.

4. Making generalizations and summing up the results of solving the problem.

1. Миттєве, комплексне миттєве значення, комплексна амплітуда гармонічного струму і напруги. Перехід від оригіналу до зображення і навпаки. Комплексні опір і провідність, їх компоненти і зв'язок між ними. Закони Ома з Кірхгофа у комплексній формі. Активна, реактивна, повна і комплексна потужності. Часові та векторні діаграми. Відлік початкових фаз і зсуву фаз за часовими та векторними діаграмами.

2. Коло гармонічного струму з одним реактивним елементом. Активний, індуктивний і ємнісний опори. Кола гармонічного струму з послідовним і паралельним з'єднанням активного опору і реактивного елемента (індуктивності або ємності). Поняття про метод комплексних амплітуд.

Задачі слід розв'язувати у такій послідовності:

1. Аналіз умов задачі, особливостей схеми кола і завдання.

2. Складання плану і ходу розв'язання задач.

3. Розв'язання задачі в загальному вигляді, потім – у числових значеннях.

4. Узагальнення та формулювання підсумків розв'язання задачі.

Solving problems

Розв'язання задач

Problem 1

Задача 1

a) It is given:

а) Дано:

$$i(t) = 14,1 \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ mA.}$$

To calculate: $I_m, I, I_m(j\omega, t)$.

Визначити: $I_m, I, I_m(j\omega, t)$.

Solution:

Розв'язання:

$$\dot{I}_m = 14,1 e^{j30^\circ}; \dot{i} = \frac{14,1}{\sqrt{2}} e^{j30^\circ} = 10 e^{j30^\circ}; I_m(j\omega, t) = 14,1 e^{j(\omega t + 30^\circ)}.$$

b) It is given:

б) Дано:

$$\dot{U}_m = 141 e^{-j40^\circ}.$$

To define: $\dot{U}, U_m(j\omega, t), u(t)$ for the cases of sine and cosine laws of variation. For both cases vector and time diagrams are to be built, with the initial phase pointed on them (Fig. 2.4.1).

Визначити $\dot{U}, U_m(j\omega, t), u(t)$ з урахуванням синусоїдального і косинусоїдального законів зміни. В обох випадках побудувати векторні і часові діаграми із зазначенням на них початкової фази (рис. 2.4.1).

Solution

Розв'язання

$$\dot{U} = \frac{141}{\sqrt{2}} e^{-j40^\circ} = 100 e^{-j40^\circ}; U_m(j\omega, t) = 141 e^{j(\omega t - 40^\circ)};$$

$$u(t) = \begin{cases} 141 \sin(\omega t - 40^\circ) = \text{Im}[141 e^{j(\omega t - 40^\circ)}] \\ 141 \cos(\omega t - 40^\circ) = \text{Re}[141 e^{j(\omega t - 40^\circ)}] \end{cases}.$$

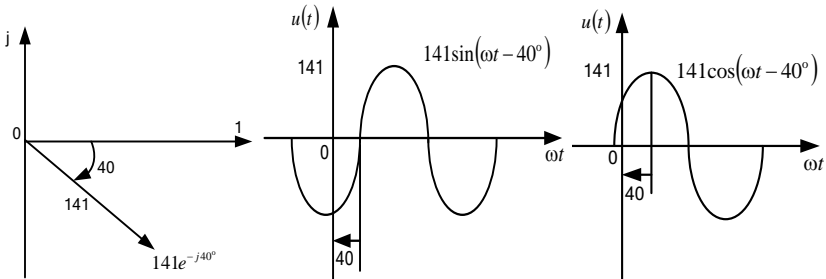


Fig. 2.4.1. Voltage vector and time diagrams

Рис. 2.4.1. Векторна та часова діаграми напруги

c) It is given:

в) Дано:

$$\dot{U}_m = 300e^{-j40^\circ}; \dot{I}_m = 3e^{-j30^\circ}.$$

To define: $\varphi = \psi_u - \psi_i$. Mark this angle on the time and vector diagrams (Fig. 2.4.2).

Визначити: $\varphi = \psi_u - \psi_i$. Позначити цей кут на часовій і векторній діаграмах (рис. 2.4.2).

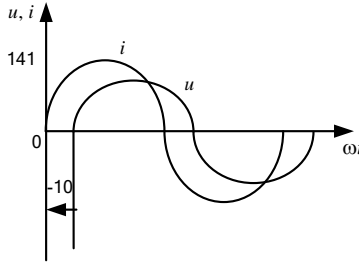
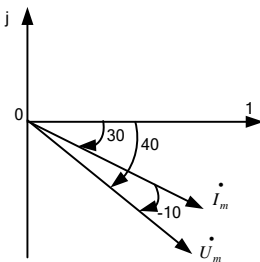
Answer the question: is it possible, that $\varphi > 90^\circ$.

Відповісти, чи може бути $\varphi > 90^\circ$.

Solution:

Розв'язання:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -40 - (-30) = -10^\circ.$$



Readout from \dot{U}_m to \dot{I}_m

Readout from u to i

Fig. 2.4.2. Voltage and current vector and time diagrams
Рис. 2.4.1. Векторні та часові діаграми напруги та струму

Problem 2

Задача 2

The diagram of electric circuit is given (Fig. 2.4.3)

Дано схему електричного кола (рис. 2.4.3).

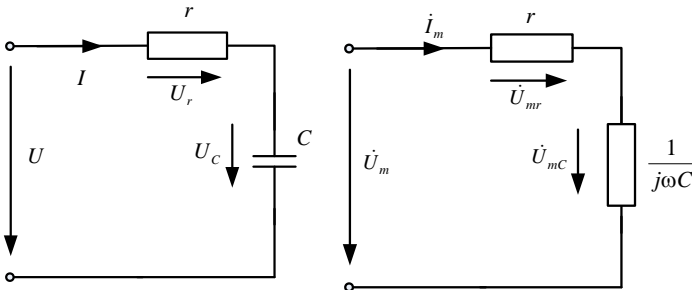


Fig. 2.4.3. The circuit diagram for problem 2
Рис. 2.4.3. Електричне коло для задачі 2

It is known

Відомо

$$r = 1,5 \text{ k}\Omega; C = 3180 \text{ pF}; f = 10^4 \text{ Hz};$$

$$u(t) = 100 \cos(\omega t + 40^\circ) \text{ V}.$$

To find $i(t)$. Build a vector diagram.

Визначити $i(t)$. Побудувати векторну діаграму.

Solution

Розв'язання

1. We use the complex form of Ohm's law:

1. Застосування закону Ома в комплексній формі

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{Z}, Z = r - jx_C, x_C = \frac{1}{2\pi fC},$$

where x_C – capacitive reactance

де x_C – ємнісний опір.

$$x_C = \frac{10^{12}}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 3,18 \cdot 10^3} = 5 \text{ k}\Omega;$$

$$Z = 1,5 - j5 = 5,22e^{-j73^\circ 18'} \text{ k}\Omega;$$

$$\dot{I}_m = \frac{100e^{j40^\circ}}{5,22e^{-j73^\circ 18'}} = 19,16e^{-j113^\circ 18'} \text{ mA}.$$

2. Transition to the original:

2. Перехід до оригіналу:

$$i(t) = 19,16 \cos(2\pi 10^4 t + 113^\circ 18') \text{ mA}.$$

3. Vector diagram build (Fig. 2.4.4):

3. Побудова векторної діаграми (рис. 2.4.4).

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{mr} + \dot{U}_{mC}, \dot{U}_m = 100e^{j40^\circ}, \dot{I}_m = 19,16e^{j113^\circ 18'}.$$

$$\dot{U}_{mr} = r\dot{I}_m = 28,7e^{j113^\circ 18'}, \dot{U}_{mC} = -jx_C I_m = 95,8e^{j23^\circ 18'}.$$

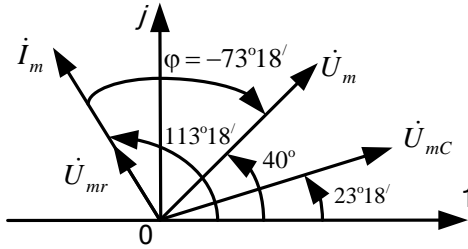


Fig. 2.4.4. Voltage and current vector diagrams
Рис. 2.4.4. Векторні діаграми напруги та струму

Problem 3

The diagram of electric circuit is given (Fig. 2.4.5)

Задача 3

Дано схему електричного кола (рис. 2.4.5).

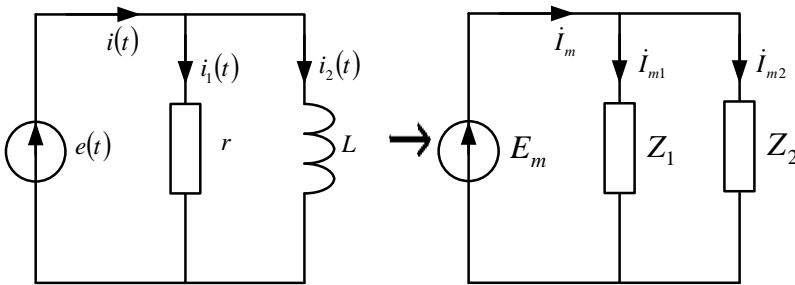


Fig. 2.4.5. The diagram of electric circuit for problem 3
Рис. 2.4.5. Схема електричного кола для задачі 3

It is known

Відомо

$$r = 500 \, \Omega; \quad L = 10 \, \text{H}; \quad e(t) = 311 \cos(10t + 38^\circ).$$

Define:

Визначити:

$$i(t), \quad \varphi = \psi_e - \psi_i, \quad S, \quad P, \quad Q.$$

$$i(t), \quad \varphi = \psi_e - \psi_i, \quad S, \quad P, \quad Q.$$

Solution

Розв'язання

1. Here are the parameters of an equivalent complex circuit:

1. Параметри еквівалентної комплексної схеми заміщення:

$$\dot{E}_m = 311e^{j38^\circ}; \quad \dot{E} = \frac{311}{\sqrt{2}}e^{j38^\circ} = 220e^{j38^\circ};$$

$$Z_1 = r = 500 \Omega, \quad Z_2 = j\omega L = j \cdot 10 \cdot 10 = j100 = 100e^{j90^\circ}.$$

2. We apply Ohm's law in the complex form: 2. Застосування закону Ома в комплексній формі;

$$\dot{I}_{m1} = \frac{\dot{E}_m}{Z_1} = \frac{311e^{j38^\circ}}{500} = 0,622e^{j38^\circ};$$

$$\dot{I}_{m2} = \frac{\dot{E}_m}{Z_2} = \frac{311e^{j38^\circ}}{100e^{j90^\circ}} = 3,11e^{-j52^\circ};$$

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{m1} + \dot{I}_{m2} = 0,622e^{j38^\circ} + 3,11e^{-j52^\circ} = 3,17e^{-j40^\circ 40'};$$

or

або

$$\dot{I}_m = \dot{E}_m \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) = 311e^{j38^\circ} \left(\frac{1}{500} + \frac{1}{100}e^{-j90^\circ} \right) = 3,17e^{-j40^\circ 40'};$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{3,17}{\sqrt{2}}e^{-j40^\circ 40'} = 2,24e^{-j40^\circ 40'}.$$

3. Transition to the original and determination of the phase shift angle: 3. Перехід до оригіналу та визначення кута зсуву фаз

$$i(t) = 3,17 \cos(10t - 40^\circ 40') \text{ A}; \quad \varphi = \psi_e - \psi_i = 38^\circ + 40^\circ 40' = 78^\circ 40'.$$

4. Calculation of powers: 4. Розрахунок потужностей

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = 220e^{j38^\circ} \cdot 2,24e^{j40^\circ 40'} = 493e^{j78^\circ 40'} = 97 + j480;$$

$$P = 97 \text{ W}; \quad Q = 480 \text{ VAR}.$$

5. Building a vector diagram (Fig. 2.4.6). 5. Побудова векторної діаграми (рис. 2.4.6).

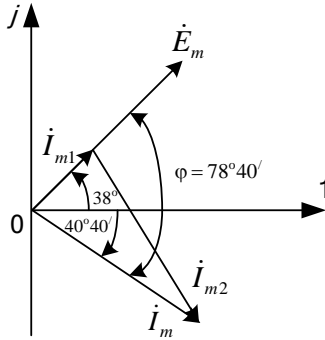


Fig. 2.4.6. Voltage and current vector diagrams
Рис. 2.4.6. Векторні діаграми напруги та струму

Problem 4

The diagram of electric circuit is given (Fig. 2.4.7)

Задача 4

Дано схему електричного кола (рис. 2.4.7).

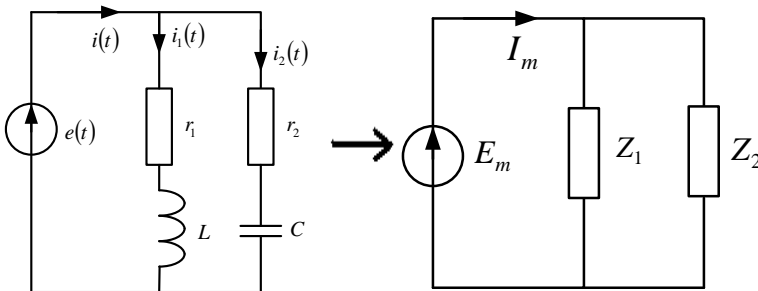


Fig. 2.4.7. The diagram of electric circuit for problem 4
Рис. 2.4.7. Схема електричного кола для задачі 4

It is known

Відомо

$$r_1 = 10 \text{ } \Omega; \quad r_2 = 15 \text{ } \Omega; \quad L = 15 \text{ mH}; \quad C = 2,35 \text{ } \mu\text{F};$$

$$e(t) = 130 \sin 5 \cdot 10^3 t \text{ V.}$$

Define $i(t)$.

Визначити $i(t)$.

Solution;

Розв'язання;

1. Here are the parameters of an equivalent complex circuit:

1. Параметри еквівалентної комплексної схеми заміщення:

$$Z_1 = r_1 + j\omega L = 10 + j5 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 10 + j75 = 76e^{j82^\circ} ;$$

$$Z_2 = r_2 + \frac{1}{j\omega C} = 15 + \frac{1}{j5 \cdot 10^3 \cdot 2,35 \cdot 10^{-6}} = 15 - j85 = 86,5e^{-j80^\circ} .$$

2. We apply Ohm's law in the complex form:

2. Застосування закону Ома в комплексній формі:

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{76e^{j82^\circ}} + \frac{1}{86,5e^{-j80^\circ}} = 4,2 \cdot 10^{-3} e^{-j22^\circ 38'} ;$$

$$\dot{I}_m = \dot{E}_m Y = 130 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} e^{-j22^\circ 38'} = 0,546 e^{-j22^\circ 38'} ;$$

$$i(t) = 0,546 \sin(5 \cdot 10^3 t - 22^\circ 38') .$$

Homework

Домашнє завдання

The diagram of electric circuit is given (Fig. 2.4.8)

1. Дано схему електричного кола (рис. 2.4.8).

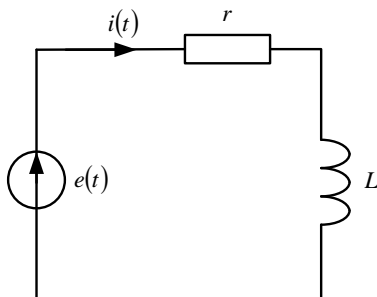


Fig. 2.4.8. The diagram of electric circuit for homework

Рис. 2.4.8. Схема електричного кола для домашнього завдання

It is known

Відомо

$$r = 6 \Omega ; L = 8 \text{ mH} ; \omega = 10^3 \text{ rad/s} ; e(t) = 7 \sin(\omega t + 60^\circ) \text{ V} .$$

Define $i(t)$, $u_r(t)$, $u_L(t)$, $\varphi = \psi_e - \psi_i$. To build time and vector diagram.
 Визначити $i(t)$, $u_r(t)$, $u_L(t)$, $\varphi = \psi_e - \psi_i$. Побудувати часову і векторну діаграми.

Answer:

Відповідь:

$$Z = 10e^{j53^\circ 12'}; I_m = 0,7e^{j6^\circ 48'}; U_{mr} = 4,2e^{j6^\circ 48'}; U_{mL} = 5,6e^{j96^\circ 48'}$$

2. Find currents i_4 and i_2 in problem 4 and check the power balance.

2. Знайти струми i_4 та i_2 в задачі 4 і перевірити баланс потужностей.

Practical class 5

CALCULATION OF COMPLEX HARMONIC CURRENT CIRCUITS

Aim of the class. Consolidating the students' skills in application of the complex amplitude method for calculation of harmonic current circuits, including calculation of powers and power balance verification. Learning the methods of loop currents and node voltages in the complex form.

Methodological recommendations

Before starting to solve the problems, it is necessary to make revision and learn the necessary material on the theory of linear electric circuits:

1. Complex amplitude method. Peculiarities of complex harmonic current circuit calculation. The concept of an equivalent complex circuit. Power and balance of powers in a harmonic current circuit.

2. Making loop (node) equations in the complex form.

Практичне заняття 5

РОЗРАХУНОК СКЛАДНИХ КІЛ ГАРМОНІЧНОГО СТРУМУ

Мета заняття. Закріпити навички застосування методу комплексних амплітуд для розрахунку кіл гармонічного струму, включаючи розрахунок потужностей і перевірку балансу потужностей. Засвоїти методи контурних струмів і вузлових напруг у комплексній формі.

Методичні рекомендації

Перед розв'язанням задач необхідно повторити та засвоїти такі питання теорії лінійних електричних кіл:

1. Метод комплексних амплітуд. Особливості розрахунку складних кіл гармонічного струму. Поняття про еквівалентну комплексну схему. Потужність і баланс потужностей у колі гармонічного струму.

2. Складання контурних (вузлових) рівнянь у комплекс-

Solving a system of equations by the matrix method.

The problems are to be solved in the following order:

1. Analyzing the problem situation, the peculiarities of the circuit and those of the problem.

2. Planning the sequence of problem solution operations.

3. Solving the problem first in general, then numerically.

4. Making generalizations and summing up the results of solving the problem.

During a practical class the students have to perform a lot of manipulations and calculations with complex numbers, which are especially bulky in problem 2. In the course of problem solution it is very important to keep to brevity in mathematical calculations, supervising and analyzing the problem solution process.

Solving problems

Problem 1

It is given the electric circuit (Fig. 2.5.1):

сній формі. Розв'язання системи рівнянь матричним методом.

Задачі слід розв'язувати у такій послідовності:

1. Аналіз умов задачі, особливостей схеми кола і завдання.

2. Складання плану і ходу розв'язання задач.

3. Розв'язання задачі спочатку в загальному вигляді, потім – у числовому вираженні.

4. Узагальнення та формулювання підсумків розв'язання задачі.

Особливістю практичного заняття є необхідність виконання великого обсягу дій і розрахунків з комплексними числами, відносна громіздкість яких зростає в задачі 2. Дуже важливо у ході розв'язання задач, притримуватись найбільшої лаконічності в математичних викладках і розрахунках, контролюючи й аналізуючи хід розв'язання задачі.

Розв'язання задач

Задача 1

Дано схему електричного кола (рис. 2.5.1).

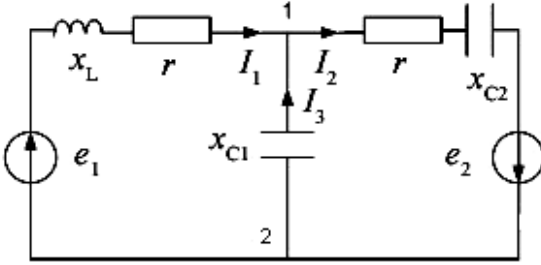


Fig. 2.5.1. The diagram of electric circuit for problem 1
Рис. 2.5.1. Схема електричного кола для задачі 1

It is known

Відомо

$$e_1 = 20\sqrt{2} \cos(\omega t + 30^\circ); e_2 = 80\sqrt{2} \cos \omega t; r = 26 \Omega;$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C1} = 10 \Omega; X_{C2} = \frac{1}{\omega C2} = 5 \Omega; X_L = \omega L = 25 \Omega.$$

To find i_1, i_2, i_3 by loop currents method. To verify the balance of powers.

Визначити i_1, i_2, i_3 методом контурних струмів. Перевірити баланс потужностей.

Solution

Розв'язання

Build an equivalent complex circuit (Fig. 2.5.2)

Скласти еквівалентну комплексну схему (рис. 2.5.2).

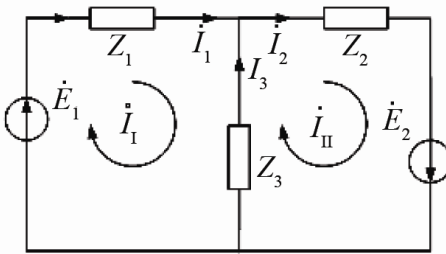


Fig. 2.5.2. Equivalent complex circuit
Рис. 2.5.2. Еквівалентна комплексна схема

where $Z_1 = r + jx_L = 26 + j25$; $Z_2 = r + jx_{C2} = 26 - j5$; $Z_3 = -j10$;
 $E_1 = 20e^{j30^\circ}$; $E_2 = 80$.

1. The solution is found by the loop current method using the equivalent complex circuit.

1. Розв'язання шукаємо методом контурних струмів за еквівалентною комплексною схемою:

$$\begin{cases} Z_{11}\dot{I}_I + Z_{12}\dot{I}_{II} = \dot{E}_I \\ Z_{21}\dot{I}_I + Z_{22}\dot{I}_{II} = \dot{E}_{II} \end{cases} \text{ or } \begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12} \\ Z_{21}Z_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_I \\ \dot{I}_{II} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{E}_I \\ \dot{E}_{II} \end{vmatrix}.$$

The complex loop reactances:

Комплексні контурні опори:

$$Z_{11} = Z_1 + Z_3 = 26 + j25 - j10 = 26 + j15 = 30e^{j30^\circ};$$

$$Z_{22} = Z_2 + Z_3 = 26 - j5 - j10 = 26 - j15 = 30e^{-j30^\circ};$$

$$Z_{12} = Z_{21} = -Z_3 = j10 = 10e^{j90^\circ}.$$

The complex loop EMF's:

Комплексні контурні ЕРС:

$$\dot{E}_I = \dot{E}_1 = 20e^{j30^\circ};$$

$$\dot{E}_{II} = \dot{E}_2 = 80.$$

The determinants of the system of loop equations necessary for Kramer's formulas to be applied:

Визначники системи контурних рівнянь, необхідні для застосування формул Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} Z_{11}Z_{12} \\ Z_{21}Z_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 30e^{j30^\circ} & j10 \\ j10 & 30e^{-j30^\circ} \end{vmatrix} = 900 - j^2 100 = 10^3;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} E_I Z_{12} \\ E_{II} Z_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 20e^{j30^\circ} & j10 \\ 80 & 30e^{-j30^\circ} \end{vmatrix} = 600 - j800 = 10^3 e^{-j53^\circ 7'};$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \begin{vmatrix} Z_{11}E_I \\ Z_{21}E_{II} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 30e^{j30^\circ} & 20e^{j30^\circ} \\ j10 & 80 \end{vmatrix} = 2400e^{j30^\circ} - j200e^{j30^\circ} = \\ &= 2080 + j1200 - j173 + 100 = 2180 + j1027 = 2410e^{j25^\circ 10'}. \end{aligned}$$

The complex loop currents are determined using Kramer's formulas: Комплексні контурні струми визначимо за допомогою формул Крамера:

$$i_I = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{10^3 e^{-j53^\circ 7'}}{10^3} = e^{-j53^\circ 7'};$$

$$i_{II} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{2410 e^{j25^\circ 10'}}{10^3} = 2,41 * e^{j25^\circ 10'}.$$

The currents in the branches are found in terms of loop currents: Струми у гілках знайдемо через контурні струми:

$$i_1 = I_I = e^{-j53^\circ 7'}, i_1 = 1 \cdot \cos(\omega t - 53^\circ 7');$$

$$i_2 = I_{II} = 2,41 e^{j25^\circ 10'}, i_2 = 2,41 \cos(\omega t + 25^\circ 10');$$

$$i_3 = I_{II} - I_I = 2,41 e^{j25^\circ 10'} - e^{-j53^\circ 7'} = 2,18 + j1,027 - 0,6 + j0,8 =$$

$$= 1,58 + j1,827 = 2,414 e^{j49^\circ 10'}, i_3 = 2,414 \cos(\omega t + 49^\circ 10');$$

2. For checking the power balance the complex powers are calculated first. The complex powers of the sources are: 2. Перевіримо баланс потужностей. Для цього слід спочатку розрахувати комплексні потужності. Комплексна потужність джерел:

$$\tilde{S}_{1source} = \dot{E}_1 I_1^* = 20 e^{j30^\circ} e^{j53^\circ 7'} = 20 e^{j83^\circ 7'} = 2,4 + j19,9;$$

$$\tilde{S}_{2source} = \dot{E}_2 I_2^* = 80 e^{-j25^\circ 10'} = 174,6 - j82,2;$$

$$\tilde{S}_{source} = \tilde{S}_{1source} + \tilde{S}_{2source} = 2,4 + j19,9 + 174,6 - j82,2 =$$

$$= 177 - j62,3 = P_{source} + jQ_{source}.$$

The complex powers of the energy consumers are: Комплексна потужність споживачів енергії:

$$\tilde{S}_{1cons.} = Z_1 I_1^2 = (26 + j25) \cdot 1^2 = 26 + j25;$$

$$\tilde{S}_{2_{cons.}} = Z_2 I_2^2 = (26 - j5) \cdot 2,41^2 = 151 - j29,1;$$

$$\tilde{S}_{3_{cons.}} = Z_3 I_3^2 = -j10 \cdot 2,41^2 = -j58,2;$$

$$\tilde{S}_{cons.} = \tilde{S}_{1_{cons.}} + \tilde{S}_{2_{cons.}} + \tilde{S}_{3_{cons.}} = 177 - j62,3 = P_{cons.} + jQ_{cons.}.$$

The power balance is proved by comparing the real and imaginary parts of the complex powers of the sources and consumers:

Баланс потужностей перевіряється шляхом порівняння дійсних і уявних частин комплексних потужностей джерел і споживачів:

$$S_{source} = 177 - j62,3 = S_{cons.} = 177 - j62,3;$$

$$P_{source} = P_{cons.}; \quad Q_{source} = Q_{cons.}.$$

This simultaneous balance of the active and reactive powers confirms that the problem has been solved correctly.

Виконання балансу активних і реактивних потужностей одночасно свідчить про правильність розв'язання задачі.

Problem 2

Задача 2

It is given the electric circuit (Fig. 2.5.2). Circuit's parameters:

Дано схему електричного кола (рис. 2.5.2). Параметри кола:

$$e_1 = 20 \cos(\omega t + 30^\circ), \quad e_2 = 80 \cos \omega t, \quad r = 26 \, \Omega, \quad X_{C1} = 5 \, \Omega,$$

$$X_{C2} = 10 \, \Omega, \quad X_L = 25 \, \Omega.$$

Define i_1, i_2, i_3 by node voltages method.

Визначити i_1, i_2, i_3 методом вузлових напруг.

Solution

Розв'язання

Build an equivalent complex circuit (Fig. 2.5.3).

1. Складемо еквівалентну комплексну схему (рис. 2.5.3).

In order for application of the node-voltage method to be clearly evident, the voltage sources should be replaced by their equivalent current sources (Fig. 2.5.3).

Для наочності застосування методу вузлових напруг джерела напруги слід замінити еквівалентними джерелами струму (рис. 2.5.3).

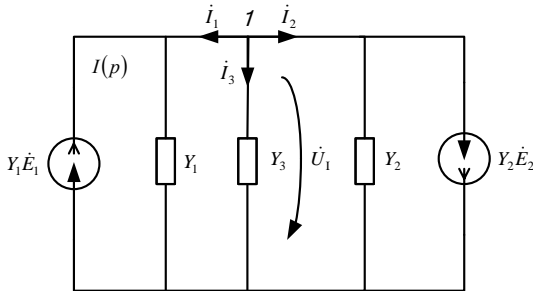


Fig. 2.5.3. Equivalent complex circuit
Рис. 2.5.3. Еквівалентна комплексна схема

Then the complex elements of the circuit are calculated: Розрахунок елементів комплексної схеми:

$$Z_1 = 26 + j25 = 36,1e^{j43,9^\circ}; \quad Y_1 = \frac{1}{Z_1} = 0,0271e^{-j43,9^\circ};$$

$$Z_2 = 26 - j5 = 26,5e^{-j10,9^\circ}; \quad Y_2 = \frac{1}{Z_2} = 0,0377e^{j10,9^\circ};$$

$$Z_3 = -j10 = 10e^{-j90^\circ}; \quad Y_3 = j0,1 = 0,1e^{j90^\circ};$$

$$\dot{E}_1 = 20e^{j30^\circ} = 17,3 + j10; \quad E_2 = 80.$$

2. Then we build a node equation and find its solution: 2. Складемо вузлове рівняння і знайдемо його розв'язок:

$$Y_{11}U_I = I_1;$$

$$(Y_1 + Y_2 + Y_3)U_I = Y_1\dot{E}_1 - Y_2\dot{E}_2;$$

$$\dot{U}_I = \frac{Y_1\dot{E}_1 - Y_2\dot{E}_2}{Y_1 + Y_2 + Y_3}.$$

The calculations above would be more convenient to do if they were broken down into smaller operations that could be done by Для виконання розрахунків їх зручно розбити на окремі дії, які можна запропонувати виконувати студен-

several different students, for example, sitting in different rows: там, наприклад тим, які сидять на різних рядах:

$$\dot{I}_I = Y_1 \dot{E}_1 = 0,0271 e^{-j43,9^\circ} 20 e^{j30^\circ} = 0,542 e^{-j13,9^\circ} = 0,526 - j0,13;$$

$$\dot{I}_{II} = Y_2 \dot{E}_2 = 0,0377 e^{j10,9^\circ} 80 = 3,02 e^{j10,9^\circ} = 2,97 - j0,527;$$

$$\dot{I} = \dot{I}_I - \dot{I}_{II} = Y_1 \dot{E}_1 - Y_2 \dot{E}_2 = -2,44 + j0,701 = 2,54 e^{j164^\circ};$$

$$Y_{11} = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 0,0565 + j0,0883 = 0,105 e^{j56,4^\circ};$$

$$\dot{U}_I = \frac{\dot{I}}{Y_{11}} = \frac{-2,54 e^{j16^\circ}}{0,105 e^{j56,4^\circ}} = -24,2 e^{j40,4^\circ} = -18,4 + j15,7.$$

Currents in the branches are expressed in terms of node voltages, using the complex form of Ohm's law for branches with an EMF source: Струми у гілках виразимо через вузлову напругу, використовуючи закон Ома в комплексній формі для гілок з джерелом ЕРС:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= (\dot{U}_I - \dot{E}_1) Y_1 = (-18,4 + j15,7 - 17,3 - j10) 0,0271 e^{-j43,9^\circ} = \\ &= (-35,7 + j5,7) 0,0271 e^{-j43,9^\circ} = -36,2 e^{-j9,1^\circ} 0,0271 e^{-j43,9^\circ} = \\ &= -0,981 e^{-j53^\circ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= (\dot{U}_I + \dot{E}_2) Y_2 = (-18,4 + j15,7 + 80) 0,0377 e^{j10,9^\circ} = \\ &= (61,6 + j15,7) 0,0377 e^{j10,9^\circ} = 63,6 e^{j14,3^\circ} 0,0377 e^{j10,9^\circ} = \\ &= 2,4 e^{j25,2^\circ}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_I Y_3 = -24,2 e^{-j40,4^\circ} 0,1 e^{j90^\circ} = -2,42 e^{j49^\circ}.$$

From complex values we turn to the originals of currents Від комплексних величин переходимо до оригіналів струмів

$$i_1 = -0,981 \cos(\omega t - 53^\circ); \quad i_2 = 2,4 \cos(\omega t - 25,2^\circ);$$

$$i_3 = -2,42 \cos(\omega t - 49,6^\circ).$$

Compare the results obtained with the calculation results of Отриманий результат необхідно порівняти з результа-

problem № 1 and explain the difference both in signs and in values.

том розрахунку в задачі 1, пояснивши різницю у знаках і відхилення у числових значеннях.

Homework

Do the calculation-graphic work for given diagram according to following example (Fig. 2.5.4).

Домашнє завдання

Виконати розрахунково-графічну роботу для заданої схеми згідно з наведеним нижче прикладом (рис. 2.5.4).

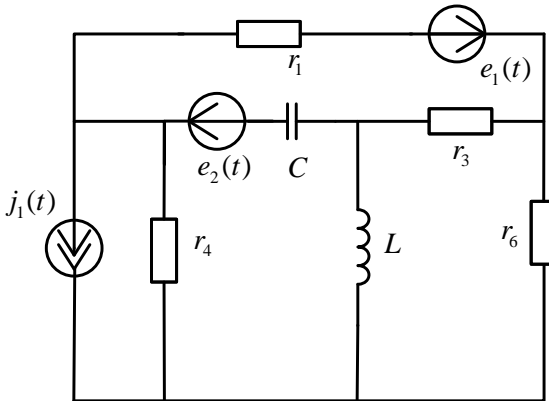


Fig. 2.5.4. The diagram of electric circuit for homework
Рис. 2.5.4. Схема електричного кола для домашнього завдання

It is known

Відомо:

$$r_1 = 135 \text{ k}\Omega; r_3 = 260 \text{ k}\Omega; r_4 = r_6 = 140 \text{ k}\Omega; C = 1,226 \text{ pF};$$

$$L = 16 \text{ mH}; e_1(t) = 112,5 \sin(1,125 \cdot 10^7 t) \text{ V};$$

$$e_2(t) = 87,5 \sin(1,125 \cdot 10^7 t + 195^\circ) \text{ V};$$

$$j_1(t) = 11 \sin(1,125 \cdot 10^7 t + 175^\circ) \text{ mA}.$$

Calculation procedure

1. Construct an equivalent complex circuit and mark conditional-positive directions of currents on it (for example, as it is done in Fig. 2.5.5).

Порядок розрахунку

1. Побудувати еквівалентну комплексну схему і позначити на ній умовно-додатні напрямки струмів (наприклад, як це зроблено на рис. 2.5.5).

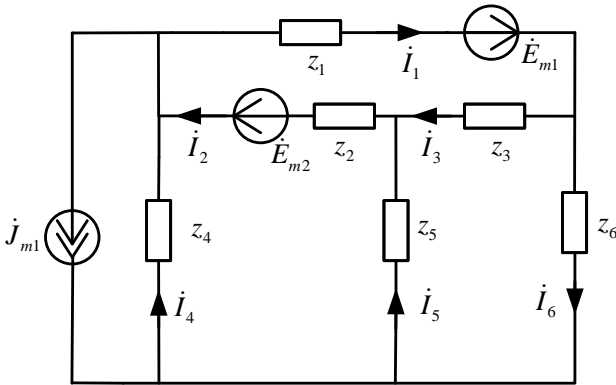


Fig. 2.5.5. Equivalent complex circuit
Рис. 2.5.5. Еквівалентна комплексна схема

Write the values of complex impedances $z_1 - z_6$, EMF \dot{E}_{m1} , and current \dot{J}_{m1} .

2. According to the complex current method, convert the current source to a source of voltage $\dot{E}_{m3} = \dot{J}_{m1}z_4$ and mark the conditionally positive direction of loop tracing (Fig. 2.5.6).

Записати значення комплексних опорів $z_1 - z_6$, ЕРС \dot{E}_{m1} , \dot{E}_{m2} та струму \dot{J}_{m1} .

2. Згідно з методом комплексних струмів джерело струму перетворимо у джерело напруги $\dot{E}_{m3} = \dot{J}_{m1}z_4$ і позначимо умовно-додатний напрям обходу контурів (рис. 2.5.6).

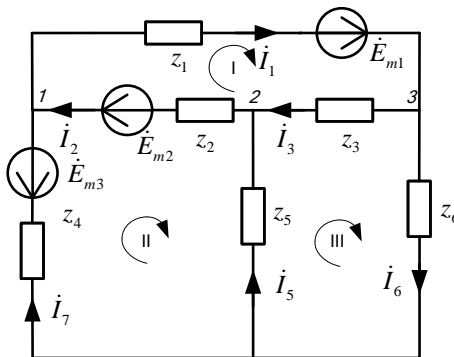


Fig. 2.5.6. Transformed equivalent complex circuit
Рис. 2.5.5. Перетворення еквівалентної комплексної схеми

3. Make a matrix of loop impedances and loop EMFs.

4. Find the loop currents.

5. Find the complex currents in the branches. Check the observance of Kirchhoff's laws.

6. Find the originals of currents in the branches.

7. Check the observance of the power balance condition.

3. Складаємо матрицю контурних опорів та контурних ЕРС.

4. Знаходимо контурні струми.

5. Знаходимо комплексні струми у гілках. Перевіряємо виконання законів Кірхгофа.

6. Знаходимо оригінали струми у гілках.

7. Перевіряємо виконання умови балансу потужностей.

Practical class 6

SINGLE AND COUPLED OSCILLATORY CIRCUITS

Aim of the class. Consolidating the students' knowledge of oscillatory circuits and their ability to use primary and secondary parameters of oscillatory circuits in calculations.

Methodological recommendations

Before starting to solve the problems, it is necessary to make revision and learn the necessary material on the theory of linear electric circuits:

1. The concept of an oscillatory circuit.

2. Absolute, relative and generalized detuning, detuning factor and their quantitative representation.

Практичне заняття 6

ОДИНОЧНІ ТА ЗВ'ЯЗАНІ КОЛИВАЛЬНІ КОНТУРИ

Мета заняття. Закріпити знання студентів про коливальні контури, уміння користуватися первинними і вторинними параметрами контурів для розрахунків.

Методичні рекомендації

Перед розв'язанням задач, необхідно повторити та засвоїти такі питання теорії лінійних електричних кіл:

1. Поняття коливального контуру.

2. Абсолютний розлад, відносний розлад, узагальнений розлад, фактор розладу і їх кількісне вираження.

3. The concept of bandwidth, the shape factor of an oscillatory circuit and their relation to circuit selectivity.

4. The difference between the properties of series and parallel oscillatory circuits as well as between their secondary parameters.

5. Application fields of series and parallel oscillatory circuits.

6. Basic properties of complex parallel oscillatory circuits.

7. Frequency characteristics of series and parallel oscillatory circuits and those of simple and complex parallel oscillatory circuits.

The problems are to be solved in the following order:

1. Analyzing the problem situation, the peculiarities of the circuit and those of the problem.

2. Planning the sequence of problem solution operations.

3. Solving the problem first in general, then numerically.

4. Making generalizations and summing up the results of solving the problem.

Solving problems

Problem 1

It is given a chart of electric circuit (Fig. 2.6.1).

The series oscillatory circuit has been tuned to resonance.

3. Поняття смуги пропускання і коефіцієнт прямокутності контуру та їх зв'язок з вибірковістю кола.

4. Різниця між властивостями послідовного і паралельного контурів та їх вторинними параметрами.

5. Застосування послідовного і паралельного контурів.

6. Основні властивості складних паралельних контурів.

7. Частотні характеристики послідовного і паралельного контурів; простого і складного паралельних контурів.

Задачі слід розв'язувати у такій послідовності:

1. Аналіз умов задачі, особливостей схеми кола.

2. Складання плану і ходу розв'язання задач.

3. Розв'язання задачі спочатку в загальному вигляді, потім – у числовому вираженні.

4. Узагальнення та формулювання підсумків розв'язання задачі.

Розв'язання задач

Задача 1

Дано схему електричного кола (рис. 2.6.1).

Послідовний коливальний контур, настроєний в резонанс.

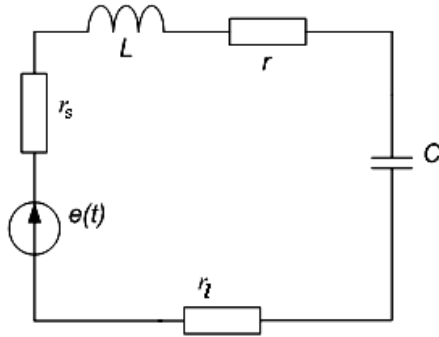


Fig. 2.6.1. Series oscillatory circuits
 Рис. 2.6.1. Послідовний коливальний контур

It's given: $L=0,1$ H, $C=1100$ pF, $r=46$ Ω , $r_s=175$ Ω , $E=4,5$ V (effective value).
 Дано: $L=0,1$ Гн, $C=1100$ пФ, $r=46$ Ом, $r_{дж}=175$ Ом, $r_h=550$ Ом, $E=4,5$ В (діюче значення).

To find out f_0 , I_0 , U_{L0} , U_{C0} , $U_{r,\ell}$ (550), when:

- a) $r_\ell = 550$ Ω ;
- b) $r_\ell = 1830$ Ω .

Визначити f_0 , I_0 , U_{L0} , U_{C0} , $U_{r,\ell}$ (550), якщо:

- a) $r_h = 550$ Ом;
- б) $r_h = 1830$ Ом.

Solution

1. The resonance frequency of the oscillatory circuit (checked experimentally)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{0,1 \cdot 1100 \cdot 10^{-12}}} = 15,2 \text{ kHz.}$$

2. The resonance current in the oscillatory circuit

$$I_0 = \frac{E}{r + r_s + r_\ell};$$

Розв'язання

1. Резонансна частота контуру (перевіряється експериментально):

2. Струм у контурі у разі резонансу

$$I_0 = \frac{4,5}{46 + 175 + 550} = \frac{4,5}{771} = 5,8 \text{ mA};$$

$$I_0' = \frac{4,5}{46 + 175 + 1830} = \frac{4,5}{2051} = 2,2 \text{ mA}.$$

3. The characteristic impedance of the circuit

3. Хвильовий опір контуру

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,1}{1100 \cdot 10^{-12}}} = 9,5 \text{ k}\Omega.$$

4. The quality factor (Q-factor) of the circuit (equivalent):

4. Добротність контуру (еквівалентна):

$$Q_e = \frac{\rho}{r + r_s + r_\ell};$$

$$Q_e = \frac{9,55 \cdot 10^3}{46 + 175 + 550} = 12,4;$$

$$Q_e' = \frac{9,55 \cdot 10^3}{46 + 175 + 1830} = 4,65.$$

5. The effective values of the voltage across the inductor and capacitor

5. Дійсні значення напруги на індуктивності та ємності

$$U_{L0} = U_{C0} = I_0 x_L = I_0 x_C = I_0 \omega L = I_0 2\pi f_0 L =$$

$$= 5,8 \cdot 10^{-3} \cdot 6,28 \cdot 15,2 \cdot 10^3 \cdot 0,1 = 52,9 \text{ V};$$

$$U_{L0}' = 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 6,28 \cdot 15,2 \cdot 10^3 \cdot 0,1 = 20,4 \text{ V}.$$

6. The voltage across the outer load

6. Напруга на зовнішньому навантаженні

$$U_{r,\ell} (550) = I_0 \cdot r_\ell = 5,84 \cdot 10^{-3} \cdot 550 = 3,2 \text{ V}.$$

7. The relative bandwidth

7. Відносна смуга пропускання

$$\Pi_{\text{Rel}} = \frac{1}{Q_e} = \frac{1}{12,5} = 0,08;$$

$$\Pi'_{\text{Rel}} = \frac{1}{Q'_e} = \frac{1}{4,6} = 0,22 .$$

8. The absolute bandwidth 8. Абсолютна смуга пропускання

$$\Pi = \frac{f_0}{Q_e} = \frac{15,2 \cdot 10^3}{12,4} = 1,25 \text{ kHz};$$

$$\Pi' = \frac{f_0}{Q'_e} = \frac{14,8 \cdot 10^3}{4,6} = 3,2 \text{ kHz}.$$

Problem 2

Задача 2

It is given a electric circuit (Fig. 2.6.2).

Дано схему електричного кола (рис. 2.6.2).

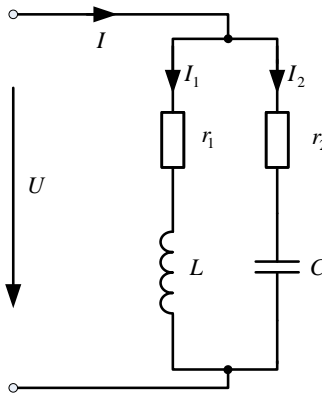


Fig. 2.6.2. Parallel oscillatory circuit
Рис. 2.6.2. Паралельний коливальний контур

It is known

Відомо

$$L = 4 \text{ mH}, C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}, r_1 = 160 \text{ }\Omega, r_2 = 120 \text{ }\Omega.$$

1. Find out whether the parallel oscillatory circuit is high-Q.

1. З'ясувати, чи є заданий паралельний коливальний контур високодобротним.

2. The current resonance frequency and the resonant resistance of the circuit.

2. Розрахувати частоту резонансу струмів і опір контуру в разі резонансу.

3. The value of r_1 for which resonance is possible at all.

4. The values of r_1 and r_2 a resonance will be indifferent.

Solution

Draw the students' attention to the presence of loss resistances in the branches. Hence, the frequencies ω_0 and ω_R will be different.

1. The characteristic impedance of the circuit:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-3}}{0,1 \cdot 10^{-6}}} = 200 \text{ } \Omega .$$

2. The Q-factor of the circuit

$$Q = \frac{\rho}{r} = \frac{\rho}{r_1 + r_2} = \frac{200}{160 + 120} = 0,715 .$$

Since an oscillatory circuit is considered high-Q if $Q \gg 1$, in our case the circuit is low-Q.

3. The resonance frequency:

$$\begin{aligned} \omega_R &= \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - r_1^2}{\rho^2 - r_2^2}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - r_1^2}{\rho^2 - r_2^2}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}} \sqrt{\frac{200^2 - 160^2}{200^2 - 120^2}} = 3,73 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{с}} . \end{aligned}$$

4. The resonance resistance of the circuit

$$Z_R = r_R = \frac{r_1 r_2 + \rho^2}{r_1 + r_2} = \frac{120 \cdot 160 + 200^2}{280} = 212 \text{ } \Omega .$$

3. За якого значення r_1 резонанс можливий взагалі.

4. За якого значення опорів r_1 , r_2 резонанс буде байдужим.

Розв'язання

Необхідно звернути увагу на наявність опорів утрат у гілках. Частоти ω_0 і ω_R будуть різні.

1. Хвильовий опір контуру

2. Добротність контуру

Оскільки контур вважається високодобротним, якщо $Q \gg 1$, то в розгляданому випадку контур низькодобротний.

3. Частота резонансу

4. Опір контуру в разі резонансу

A resonance is impossible when $r_1 > \rho$ or $r_2 > \rho$, that is when $r_1 > 200 \Omega$ or $r_2 > 200 \Omega$. A resonance will be indifferent, that is it will take place at any frequency when $r_1 = r_2 = \rho = 200 \Omega$. (Explain the last two statements).

Problem 3

A tapped-inductor parallel oscillatory circuit in which $\omega_0 = 3.18 \cdot 10^6$ rad/s, $C_2 = 600$ pF, $r = 10 \Omega$.

The inductance is to be distributed between the branches to get $R_{eo}'' = 10$ k Ω . Draw the oscillatory circuit.

Solution

The oscillatory circuit is shown in Fig. 2.6.3. It is known that

$$R_{eo}'' = R_{eo}' (m_L - m_C)^2,$$

where $m_L = \frac{L_1}{L} = \frac{L_1}{L_1 + L_2}$ – inductance turn-on ratio;

$$m_C = \frac{C}{C_1} = \frac{\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}{C_2} = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

– capacitance turn-on ratio. In this circuit $C_1 \rightarrow \infty$, that is why $m_C = 0$.

Резонанс неможливий, якщо $r_1 > \rho$ або $r_2 > \rho$, тобто якщо $r_1 > 200$ Ом або $r_2 > 200$ Ом. Резонанс буде байдужим на будь-якій частоті, якщо $r_1 = r_2 = \rho = 200$ Ом. (Поясніть два останні твердження).

Задача 3

Задано складний паралельний коливальний контур II виду, у якому $\omega_0 = 3,18 \cdot 10^6$ рад/с, $C_2 = 600$ пФ, $r = 10$ Ом.

Як треба розподілити індуктивність між гілками, щоб отримати $R_{eo}'' = 10$ кОм. Зобразіть схему контуру.

Розв'язання

Схему контуру показано на рис. 2.6.3. Відомо, що

$$R_{eo}'' = R_{eo}' (m_L - m_C)^2,$$

де $m_L = \frac{L_1}{L} = \frac{L_1}{L_1 + L_2}$ – коефіцієнт вмикання індуктивності;

$$m_C = \frac{C}{C_1} = \frac{\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}{C_2} = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

коефіцієнт вмикання ємності. У цій схемі $C_1 \rightarrow \infty$, тому $m_C = 0$.

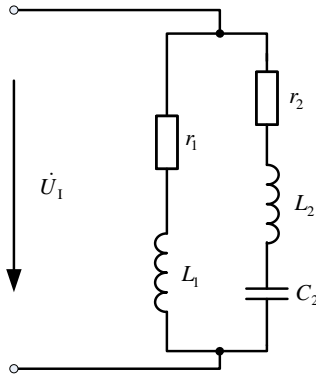


Fig. 2.6.3. The complex parallel oscillatory circuit of the second kind
Рис. 2.6.3. Складний паралельний коливальний контур II виду

Thus, $R_{eo}'' = R_{eo}' m_L^2$.

Отже, $R_{eo}'' = R_{eo}' m_L^2$.

Hence,

Звідси

$$m_L = \sqrt{\frac{R_{eo}''}{R_{eo}'}}$$

Here

Тут

$$R_{eo}' = \frac{\rho^2}{r} = \frac{\left(\sqrt{\frac{L}{C}}\right)^2}{r} = \frac{L}{Cr} \quad - \text{ is}$$

$$R_{eo}' = \frac{\rho^2}{r} = \frac{\left(\sqrt{\frac{L}{C}}\right)^2}{r} = \frac{L}{Cr} \quad - \text{ ек-}$$

equivalent resistance of an ordinary parallel oscillatory circuit.

вівалентний опір першого контуру, тобто простого паралельного коливального контуру.

$$\text{Thus, } R_{eo}' = \frac{L}{Cr} = \frac{1}{\omega_0^2 C^2 r}$$

$$\text{Отже, } R_{eo}' = \frac{L}{Cr} = \frac{1}{\omega_0^2 C^2 r},$$

$$\text{Because } \rho^2 = \frac{1}{\omega_0^2 C^2}.$$

$$\text{Оскільки } \rho^2 = \frac{1}{\omega_0^2 C^2}. \text{ Тепер}$$

Now

$$R_{eo}' = \frac{1}{3,18^2 \cdot 10^{12} \cdot (600)^2 \cdot 10^{-24} \cdot 10} = 27,8 \text{ k}\Omega,$$

$$m_L = \sqrt{\frac{10 \cdot 10^3}{27,8 \cdot 10^3}} = 0,6.$$

From the formula $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ we calculate
 Из формули $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ раховуємо

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = \frac{1}{3,18^2 \cdot 10^{12} \cdot 600 \cdot 10^{-12}} = 0,167 \text{ мН.}$$

Now
 Тепер

$$L_1 = m_L \cdot L = 0,6 \cdot 0,167 \cdot 10^{-3} = 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ мН;}$$

$$L_2 = L - L_1 = 0,167 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,067 \text{ мН.}$$

Problem 4

It is given a system of coupled oscillatory circuits (Fig. 2.6.4).

Задача 4

Дано схему зв'язних коливальних контурів (рис. 2.6.4).

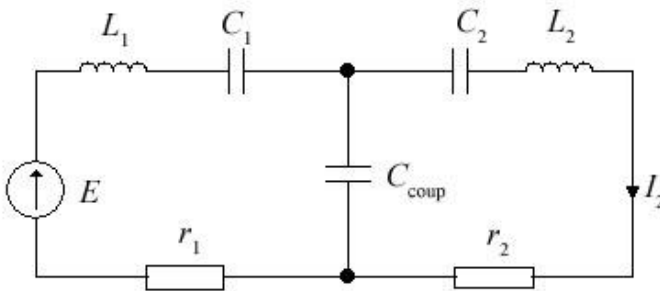


Fig. 2.6.4. The coupled oscillatory circuit

Рис. 2.6.4. Зв'язний коливальний контур

The parameters are

Параметри схеми:

$$E = 1 \text{ V}, L_1 = L_2 = 0,16 \text{ мН}, C_1 = C_2 = 250 \text{ пФ},$$

$$C_{\text{coup}} = 10000 \text{ пФ}, r_1 = r_2 = 10 \text{ }\Omega.$$

Find the bandwidth Π , maximal current in the secondary oscillatory circuit I_2 and frequen-

Знайти смугу пропускання Π , максимальний струм у вторинному контурі I_2 та частоти

cies f_1, f_2 at which this current occurs in the secondary oscillatory circuit. f_1, f_2 , на яких цей струм виникає у вторинному контурі.

Solution

Розв'язання

1. Finding the frequency of the primary oscillatory circuit

1. Знайдемо резонансну частоту первинного контуру:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = 796 \text{ kHz.}$$

2. Finding the Q-factor of the primary oscillatory circuit

2. Визначимо добротність первинного контуру:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L_1}{C_1}}}{r_1} = 80.$$

3. Finding the coupling factor between the oscillatory circuits

3. Знайдемо фактор зв'язку між контурами:

$$A = \frac{X_{ЗВ}}{\sqrt{r_1 r_2}} = \frac{1}{2\pi f_0 C_{\text{coup}} \sqrt{r_1 r_2}} = 2.$$

4. Bandwidth of the system of coupled oscillatory circuits

4. Смуга пропускання системи зв'язних контурів:

$$\Pi = \frac{f_0}{Q} \sqrt{A^2 + 2A - 1} = 26,3 \text{ kHz.}$$

5. Maximal current in the secondary oscillatory circuit

5. Максимальний струм у вторинному контурі:

$$I_{\text{max}} = \frac{E}{2\sqrt{r_1 r_2}} = 50 \text{ mA.}$$

6. The maximal current in the secondary oscillatory circuit flows at the frequencies

6. Максимальний струм у вторинному контурі протікає на частотах:

$$f_{1,2} = f_0 \left(1 \pm \frac{1}{2Q} \sqrt{A^2 - 1}\right).$$

7. Substituting the values obtained, we get

7. Підставляючи числові значення, отримуємо:

$$f_1 = 787,4 \text{ kHz; } f_2 = 804,6 \text{ kHz.}$$

Homework

Analyze the solution of problems given below:

Problem 1

The active resistance of a series oscillatory circuit is $r = 6 \text{ } \Omega$. What is its impedance if its generalized detuning is $\xi = 2$?

Solution

The total input impedance of the series oscillatory circuit is calculated as:

$$Z_{\text{in}} = r + jx = r(1 + j\xi) = 6(1 - j2) \text{ Ом.}$$

Its modulus is:

$$Z_{\text{in}} = r\sqrt{1 + \xi^2} = 6\sqrt{5} = 13,4 \text{ Ом.}$$

Problem 2

Determine the absolute detuning under which the current in a series oscillatory circuit decreases to 0.5 of its maximal value ($Q = 100$, $f = 100 \text{ kHz}$).

Solution

The equation of the normalized resonance curve of a series oscillatory circuit is:

$$n(\xi) = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}.$$

If we take $n(\xi) = 0,5$, then $\xi = \pm\sqrt{3} \approx \pm 1,73$.

Домашнє завдання

Самостійно проаналізувати розв'язання наведених нижче задач.

Задача 1

Активний опір послідовного контуру $r = 6 \text{ Ом}$. Який його повний опір у разі узагальненого розладу $\xi = 2$?

Розв'язання

Повний вхідний опір послідовного контуру розраховуємо як

Його модуль

Задача 2

Визначити величину абсолютного розладу, за якого струм у послідовному контурі зменшується до 0,5 від максимального значення ($Q = 100$, $f = 100 \text{ Гц}$).

Розв'язання

Рівняння нормованої резонансної кривої послідовного контуру

Якщо покласти $n(\xi) = 0,5$, то $\xi = \pm\sqrt{3} \approx \pm 1,73$.

As $\xi = 2Q \frac{\Delta f}{f_0}$, then Оскільки $\xi = 2Q \frac{\Delta f}{f_0}$, то

$$\Delta f = \frac{\xi f_0}{2Q} = \pm \frac{1,73 \cdot 10^6}{2 \cdot 100} = \pm 8.66 \text{ kHz.} \quad \Delta f = \frac{\xi f_0}{2Q} = \pm \frac{1,73 \cdot 10^6}{2 \cdot 100} = \pm 8.66 \text{ кГц.}$$

Problem 3

Calculate the input impedance of the parallel oscillatory circuit: $L = 600 \mu\text{H}$, $C = 200 \text{ pF}$, $r = 20 \Omega$, $\Delta f = 5 \text{ kHz}$.

Solution

Задача 3

Розрахувати вхідний опір паралельного контуру за умови: $L = 600 \text{ мкГн}$, $C = 200 \text{ пФ}$, $r = 20 \text{ Ом}$, $\Delta f = 5 \text{ кГц}$.

Розв'язання

$$Z_{\text{in}} = \frac{R_{\text{eo}}}{1 + j\xi} = \frac{R_{\text{eo}}}{1 + \xi^2} - j\xi \frac{R_{\text{eo}}}{1 + \xi^2};$$

$$R_{\text{eo}} = \frac{L}{Cr} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 10} = 1,5 \cdot 10^5 \Omega;$$

$$\xi = 2Q \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = 2 \frac{\omega_0 L}{r} \cdot \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = 4\pi \Delta f \frac{L}{r} = 4\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot \frac{6 \cdot 10^{-4}}{20} = 1,88;$$

$$r_{\text{in}} = \frac{R_{\text{eo}}}{1 + \xi^2} = \frac{1,5 \cdot 10^5}{1 + 1,88^2} = 0,33 \cdot 10^5 \Omega;$$

$$jx_{\text{in}} = -j\xi \cdot \frac{R_{\text{eo}}}{1 + \xi^2} = -j \cdot 1,88 \cdot 0,33 \cdot 10^5 \Omega;$$

$$Z_{\text{in}} = \sqrt{r_{\text{in}}^2 + x_{\text{in}}^2} = 10^5 \sqrt{0,33^2 + 0,62^2} = 0,7 \cdot 10^5 \Omega.$$

Problem 4

A series oscillatory circuit with the parameters: $R = 10 \Omega$, $L = 100 \mu\text{H}$, $C = 100 \text{ pF}$ is operated by the voltage $U = 1 \text{ V}$. To find out: ω_0 , ρ , d , Q , I_0 , P_0 , U_{L0} , U_{C0} , Π .

Задача 4

Послідовний контур з параметрами $R = 10 \text{ Ом}$, $L = 100 \text{ мкГн}$, $C = 100 \text{ пФ}$ увімкнений на напругу $U = 1 \text{ В}$. Знайти: ω_0 , ρ , d , Q , I_0 , P_0 , U_{L0} , U_{C0} , Π .

Problem 5

A parallel oscillatory circuit with the parameters

$$R_L = 9\Omega, R_C = 1\Omega, L = 100\mu H, C = 100\text{pF}$$

is operated by the voltage $U = 200\text{ V}$. Find the currents in the branches provided that the frequency has got a 0.2 % increase of the resonance frequency due to detuning.

Задача 5

Паралельний коливальний контур з параметрами:

увімкнений на напругу $U = 200\text{ В}$. Знайти струми у гілках за умови, що внаслідок розладу частота стала на 0,2 % більша від резонансної.

Practical class 7

ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN FIRST-ORDER CIRCUITS BY THE CLASSICAL METHOD

Aim of the class. Consolidating the students' practical skills in application of the method of classical analysis of transient processes in circuits with zero initial conditions. Improving their understanding of the peculiarities of the classical calculation method, basic parameters and physics of transient processes in first-order circuits.

Methodological recommendations

Before starting to solve the problems, it is necessary to make revision and learn the necessary material on the theory of linear electric circuits:

1. Causes of transient process occurrence.

Практичне заняття 7

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ КЛАСИЧНИМ МЕТОДОМ

Мета заняття. Закріпити вміння студентів практичного застосування класичного методу аналізу перехідних процесів у колах з нульовими початковими умовами. Поглибити розуміння особливостей класичного методу розрахунку, основних параметрів і фізики перехідних процесів у колах першого порядку.

Методичні рекомендації

Перед розв'язанням задач необхідно повторити й засвоїти такі питання теорії лінійних електричних кіл.

1. Причини виникнення перехідних процесів.

2. Principles, peculiarities and algorithm of transient process calculation using the classical method. Choosing the independent variables, formulation and solution of differential equations.

3. Laws of commutation, initial conditions, their application for calculation of integration constants and transient process analysis. Free component, its form and way of finding. Forced component, its form and calculation.

4. Duration of transient processes; time constant, its physical and geometrical meanings, dimension, formulas, practical value and calculation.

5. Calculation and construction of transient process charts.

6. Proving the solution by dimensions, extreme values of variables or implementation of Kirghoff's laws observance.

The problems are to be solved in the following order:

1. Analyzing the problem situation, the peculiarities of the circuit and those of the problem.

2. Qualitative analysis of processes which is based on analyzing the physics of phenomena, initial conditions and commutation laws.

3. Planning the sequence of problem solution operations.

2. Суть, особливості й алгоритм розрахунку перехідних процесів класичним методом. Вибір незалежних змінних, складання й розв'язання диференціальних рівнянь.

3. Закони комутації, початкові умови, їх застосування для розрахунку сталих інтегрування й аналізу перехідних процесів. Вільна складова, її вид і знаходження. Примусова складова, її вид і розрахунок.

4. Тривалість перехідних процесів; стала часу, її фізичний і геометричний зміст, розмірність, формули, практичне значення й розрахунок.

5. Розрахунок і побудова графіків перехідних процесів.

6. Перевірка правильності розв'язання за розмірностями, крайнім значенням величин або виконанням законів Кірхгофа.

Задачі необхідно розв'язувати за таким алгоритмом:

1. Аналіз умови задачі, особливостей схеми кола.

2. Якісний аналіз процесів, що ґрунтується на аналізі фізики явищ, початкових умов і законів комутації.

3. Аналіз плану й ходу розв'язання задачі.

4. Solving the problem first in general, then numerically.

5. Stating the problem solution findings.

Solving problems

Problem 1

rL -circuit switching on direct voltage.

On Fig. 2.7.1 it's given the circuit with following parameters: $r=120 \Omega$; $L=240 \text{ mH}$; $E=60 \text{ V}$. At moment of time $t=0$ the switch $S1$ is getting closed. To calculate $i(t)$, $U_L(t)$, t_{tr} .

4. Розв'язання задачі спочатку в загальному вигляді, потім – у числових значеннях.

5. Формулювання висновків за розв'язками задачі.

Розв'язання задач

Задача 1

Увімкнення rL -кола на постійну напругу.

На рис. 2.7.1 показано схему з параметрами: $r=120 \text{ Ом}$; $L=240 \text{ мГн}$; $E=60 \text{ В}$. У момент часу $t=0$ ключ Кл.1 замикається. Розрахувати $i(t)$, $U_L(t)$, $t_{\text{пер}}$.

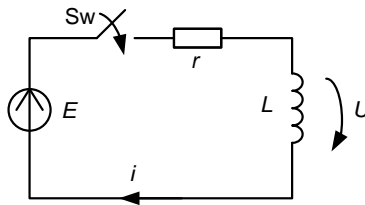


Fig. 2.7.1. Switching of rL -circuit on direct voltage
Рис. 2.7.1. Увімкнення rL -кола на постійну напругу

Solution

1. Mark the conditionally positive directions of current and voltages.

2. Set up a differential equation for the post-commutation circuit with respect to current in the inductor (quantities subject to the law of commutation, i.e. not changing stepwise) according to Kirghoff's law for voltages:

Розв'язання

1. Позначаємо умовно-додатні напрями струму й напруг.

2. Складаємо диференціальне рівняння для післякомутаційного кола щодо струму в індуктивності (величини, що підлягають закону комутації, тобто не змінюються стрибком) за законом Кірхгофа для напруг

$$U_r + U_L = E; \quad ri + L \frac{di}{dt} = E, \quad \text{where } i = i_{\text{free}} + i_{\text{forced}}$$

3. Determine the free component of current as a complete solution of a homogeneous differential equation of the circuit:

3. Визначаємо вільну складову струму як повне розв'язання однорідного диференціального рівняння кола:

$$ri_{\text{free}} + L \frac{di_{\text{free}}}{dt} = 0.$$

Characteristic equation

Характеристичне рівняння

$$r + Lp = 0,$$

where $p = -\frac{r}{L} = \frac{1}{\tau}$ – the root of the characteristic equation, $\tau = \frac{L}{r}$ – circuit time constant.

де $p = -\frac{r}{L} = \frac{1}{\tau}$ – корінь характеристичного рівняння, $\tau = \frac{L}{r}$ – стала часу кола.

Free component

Вільна складова

$$i_{\text{free}} = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}.$$

4. Determine the forced component

4. Визначаємо примусову складову струму:

$$i_{\text{forced}} = \frac{E}{r}.$$

5. Transient process current

5. Струм перехідного процесу

$$i = i_{\text{free}} + i_{\text{forced}} = \frac{E}{r} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}.$$

6. Independent initial conditions, obtained by calculation of the circuit before commutation at a moment $t = (0-)$ value $i(0-) = 0$;

6. Незалежні початкові умови, отримані розрахунком докомутаційного кола в момент $t = (0-)$ значення $i(0-) = 0$;

The law of commutation:

Закон комутації:

$$i(0-) = i(0) = i(0+) = 0,$$

then the integration constant is

тоді сталі інтегрування:

$$0 = \frac{E}{r} + A, \text{ тобто } A = -\frac{E}{r}$$

(pay special attention to finding the integration constant).

(на особливості знаходження сталої інтегрування звернути особливу увагу).

7. The final expression for current in the circuit

7. Остаточний вираз для струму в колі

$$i = \frac{E}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right).$$

8. Voltage across the inductor

8. Напряга на індуктивності

$$U_L = L \frac{di}{dt} = E e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

9. Numerical solution

9. Розв'язання в числовому вираженні:

$$\tau = \frac{L}{r} = \frac{0.24}{120} = 2 \cdot 10^{-3} = 2 \text{ ms};$$

$$i = 0,5 \left(1 - e^{-\frac{t}{2 \cdot 10^3}}\right) = 0,5 \left(1 - e^{-500t}\right) \text{ A};$$

$$U_L = 60 e^{-500t} \text{ В.}$$

10. Duration of the transient process

10. Тривалість перехідного процесу

$$t_{tr} = (4 \div 5)\tau = 4 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 8 \cdot 10^{-3} = 8 \text{ ms.}$$

11. In calculating and plotting the voltage across the inductor and current through it (Fig. 2.7.2) you needn't resort to detailed numeral calculations from considerations of

11. Під час розрахунку, будуючи графіки струму через індуктивність і напруги на індуктивності (рис. 2.7.2) з метою економії часу, не слід захоплю-

saving time; you may limit yourself to calculating the values in the extreme points ($t=0$ and $t=\infty$) and typical intermediate points ($t=\tau$, $t=2\tau$, $t=3\tau$) minding that for $t=3\tau$ the free constituent makes only 5% of its value at $t=0$, and for $t=4\tau$ – only 1,8 %.

12. Using the graphs constructed and analytical expression obtained, analyze the peculiarities of the transient process. Discuss the concept of time constant, its physical and geometrical meanings, transient process duration. Prove your solution by the extreme values of current and voltage.

ватися детальними числовими розрахунками, а розраховувати значення величин у примежових значеннях ($t=0$ і $t=\infty$) і характерних проміжних точках ($t=\tau$, $t=2\tau$, $t=3\tau$). Звертати увагу, що вже при $t=3\tau$ вільна складова становить 5% від свого значення при $t=0$, а при $t=4\tau$ – лише 1,8 %.

12. За допомогою графіків і отриманих аналітичних співвідношень проаналізувати хід і особливості перехідного процесу. Розглянути поняття сталої часу, її фізичний і геометричний зміст, тривалість перехідного процесу. Перевірити правильність розв'язання за примежовим значенням струму й напруги.

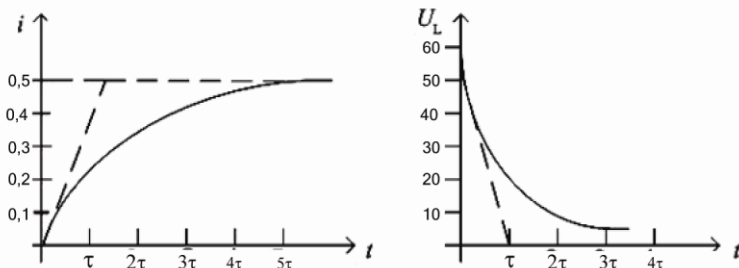


Fig. 2.7.2. Graphs of current through inductance and voltages on inductance
 Рис. 2.7.2. Графіки залежності струму через індуктивність та напруги на індуктивності від часу

Problem 2

Switching of rL -circuit on harmonic voltage source.

At Fig. 2.7.3 it's given the circuit with parameters:

Задача 2

Увімкнення rL -кола на джерело гармонічної напруги.

На рис. 2.7.3 показано схему з параметрами: $r=16$ Ом;

$e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$, $r = 16$
 Ohm; $L = 8$ мГн; $\psi = 135^\circ$; $f = 1$
 kHz. At moment of time $t = 0$ the
 switch is getting closed. To calcu-
 late $i(t)$, $U_L(t)$, t_{tr} .

$e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$, $L = 8$ мГн;
 $\psi = 135^\circ$; $f = 1$ кГц. У момент
 часу $t = 0$ ключ Кл.1 замикаєть-
 ся. Розрахувати $i(t)$, $U_L(t)$, $t_{\text{пер}}$.

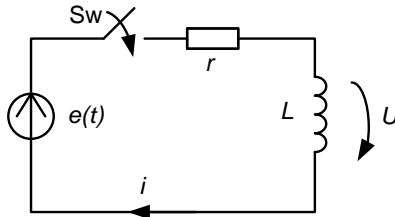


Fig. 2.7.3. Switching of rL -circuit on harmonic voltage source
 Рис. 2.7.3. Увімкнення rL -кола на змінну напругу

Solution

1. In analyzing the peculiarities of the circuit and in qualitatively analyzing the processes, it should be pointed out that this problem differs from the previous one only in the type of voltage. Hence:

a) peculiarities of calculation:

- the differential equation will differ only in its right part; the solution of this equation is the forced component;

- the forced component is calculated by the complex amplitude method;

b) peculiarities of the process :

- maximal values during a transient process may exceed their maximal values in steady operation;

Розв'язання

1. У процесі аналізу особливостей схеми і якісного аналізу процесів слід звернути увагу, що ця задача відрізняється від попередньої лише видом впливу (синусоїдальною напругою). Звідси випливає:

а) особливості розрахунку:

- диференціальне рівняння буде відрізнятися за виглядом лише правою частиною, а його розв'язання – примусовою складовою;

- примусову складову розраховують методом комплексних амплітуд;

б) особливості процесу:

- максимальні значення величин у перехідному режимі можуть перевищувати їх мак-

симальні значення в сталому режимі;

– the current and voltage will vary according to another law.

– закон зміни струму й напруги буде іншим.

2. Differential equation of the post-commutation circuit

2. Диференціальне рівняння післякомутаційного кола

$$ri + L \frac{di}{dt} = E_m \sin(\omega t + \psi).$$

3. The free component is the solution of the homogeneous equation

3. Вільна складова – розв’язок однорідного рівняння

$$ri_{\text{free}} + L \frac{di_{\text{free}}}{dt} = 0,$$

Characteristic equation

Характеристичне рівняння

$$r + Lp = 0,$$

its solution

його розв’язання

$$p = -\frac{r}{L} = -\frac{1}{\tau}, \quad \tau = \frac{L}{r}.$$

The solution of the homogeneous differential equation

Розв’язок однорідного диференціального рівняння

$$i_{\text{free}} = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}.$$

4. The forced component is calculated by the complex amplitude method

4. Розрахунок примусової складової методом комплексних амплітуд

$$\omega = 2\pi f = 6,28 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1},$$

$$Z = r + j\omega L = 16 + j6,28 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 16 + j50,2 = 53,5e^{j72^\circ 25'} \Omega;$$

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_m}{Z} = \frac{3e^{j135^\circ}}{53,5e^{j72^\circ 25'}} = 0,056e^{j62^\circ 35'} \text{ A};$$

$$i_{\text{forced}} = 0,056 \sin(\omega t + 62^\circ 35') \text{ A}.$$

Pay attention to the peculiarities of forced constituent calculation as compared to the previous problem.

5. A current in the transient state is

$$i = i_{\text{IP}} + i_{\text{B}} = 0,056 \sin(\omega t + 62^\circ 35') + Ae^{-\frac{t}{\tau}}.$$

6. Independent initial conditions

Звернути увагу на особливість розрахунку примусової складової порівняно з попередньою задачею.

5. Струм у перехідному режимі

6. Незалежні початкові умови

$$i(0-) = 0.$$

The law of commutation

Закон комутації

$$i(0-) = i(0+) = i(0) = 0.$$

Finding the integration constant

Знаходження сталої інтегрування

$$0,056 \sin 62^\circ 35' + A = 0, \text{ тобто } A = -0,056 \cdot 0,888 = -0,05.$$

7. The final expression for current in the circuit is

7. Остаточний вираз для струму в колі

$$i = 0,056 \sin(\omega t + 62^\circ 35') - 0,05e^{-2 \cdot 10^3 t} \text{ A}; \quad \tau = \frac{L}{r} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{16} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}.$$

8. Voltage across the inductor is found as $u_L = L \frac{di}{dt}$.

8. Напругу на індуктивності знайдемо як $u_L = L \frac{di}{dt}$.

However, it is rational to do it differently: the forced component should be found by the complex amplitude method of, and the free component – from a formula

Однак примусову складову доцільно знаходити методом комплексних амплітуд, а вільну – за формулою

$$u_{L\text{forced}} = L \frac{di_{\text{forced}}}{dt} \text{ V};$$

$$\dot{U}_{mL\text{forced}} = j\omega L \dot{I}_m = 50,2e^{j90^\circ} \cdot 0,056e^{j62^\circ 35'} = 2,81e^{j152^\circ 35'} \text{ V};$$

$$u_{L\text{forced}} = 2,81 \sin(\omega t + 152^\circ 35') \text{ V};$$

$$u_{L\text{free}} = -L \frac{1}{\tau} Ae^{-\frac{t}{\tau}} = 16 \cdot 0,05e^{-2 \cdot 10^3 t} = 0,8e^{-2 \cdot 10^3 t} \text{ V};$$

$$u_L = u_{L\text{free}} + u_{L\text{forced}} = 2,81\sin(\omega t + 152^\circ 35') + 0,8e^{-2 \cdot 10^3 t} \text{ V};$$

9. Proving the solution. For any instant of time the equation must be satisfied

9. Перевірка розв'язку. Для будь-якого моменту часу має виконуватися рівняння

$$u_r + u_L = e.$$

Therefore for $t=0$, when $i=0$, i.e. $u_r=0$, we get

Тому при $t=0$, коли $i=0$, тобто $u_r=0$, маємо

$$2,81\sin(152^\circ 35') + 0,8 = 3\sin 135^\circ;$$

$$2,81 \cdot 0,46 + 0,8 = 3 \cdot 0,71 \text{ or } 2,09 \approx 2,12.$$

10. Duration of the transient process

10. Тривалість перехідного процесу

$$t_{tr} = (4 \dots 5)\tau = 4,05 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 2 \text{ ms}.$$

11. When calculating and plotting the currents diagrams (Fig 2.7.4), it is reasonable to find and take into account the relationship between the circuit constant τ and the period of forced oscillations T

11. Під час розрахунку й побудови графіків струмів (рис 2.7.4) доцільно знайти й урахувати співвідношення між сталою кола τ і періодом примусових коливань T :

$$\tau = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}, T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3} \text{ s}, \frac{T}{\tau} = \frac{10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 2,$$

that is $T = 2\tau$.

тобто $T = 2\tau$.

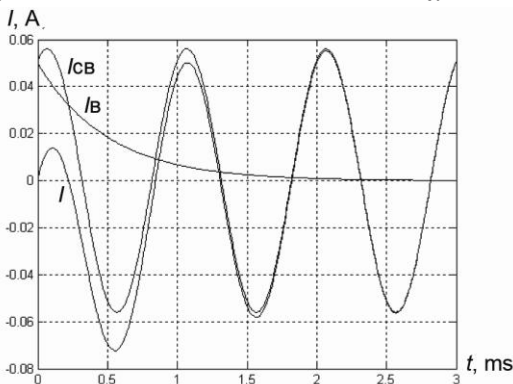


Fig. 2.7.4. Graph of current through inductance

Рис. 2.7.4. Графік залежності струму через індуктивність від часу

Homework

For an rL -series circuit powered by sine voltage (Fig. 2.7.3) calculate the voltage across the inductor and build its diagram if

$$e(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad r = 3 \, \Omega, \quad L = 0,8 \, \text{H}, \quad U_m = 10 \, \text{V}, \\ \omega = 5 \cdot 10^3 \, \text{s}^{-1}, \quad \varphi = 164^\circ.$$

Домашнє завдання

Розрахувати напругу на індуктивності й побудувати її епюру в разі ввімкнення послідовного rL -кола на синусоїдальну напругу (рис. 2.7.3), якщо

Practical class 8 ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES BY THE OPERATOR METHOD

Aim of the class. Learning the principles and expediency of using equivalent operator circuits application. Learning how to set up and use equivalent operator circuits in calculation of transient processes. Improving the students' understanding of the principles and peculiarities of the operator method of calculation and acquiring skills in applying this method for calculation of transient processes.

Methodological recommendations

Before starting to solve the problems, it is necessary to make revision and learn the necessary material on the theory of linear electric circuits:

Практичне заняття 8 АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ОПЕРАТОРНИХ СХЕМ

Мета заняття. Забезпечити засвоєння студентами сутності й доцільності застосування еквівалентних операторних схем. Навчитися складати й застосовувати еквівалентні операторні схеми під час розрахунку перехідних процесів. Поглибити розуміння особливостей і суті операторного методу розрахунку й забезпечити вміння практичного його застосування під час розрахунку перехідних процесів.

Методичні рекомендації

Перед розв'язанням задач необхідно повторити й засвоїти такі питання теорії лінійних електричних кіл.

1. Principles, peculiarities and algorithm of transient process calculation using the operator method.

2. Operator resistance and equivalent operator LC -circuits under zero and non-zero initial conditions.

3. Constructing an equivalent operator circuit. Internal and loop operator EMF.

4. Ohm's and Kirchoff's laws in the operator form. Operator equations of a circuit.

5. Possible regimes in second order circuits. Relationship between the roots of the characteristic equation of a circuit and the regime arising in it.

6. Peculiarities of the aperiodic and resonance regimes.

7. Parameters of free oscillations: time constant, duration and speed of a process.

The problems are to be solved in the following order:

1. Analyzing the problem situation, the peculiarities of the circuit and those of the problem and the initial conditions.

2. Brief qualitative analysis of processes which is based on analyzing the physics of phenomena, initial conditions and commutation laws.

3. Planning the sequence of problem solution operations.

1. Суть, особливості й алгоритм розрахунку перехідних процесів операторним методом.

2. Операторні опір й еквівалентні операторні схеми елементів L і C за нульових і ненульових початкових умов.

3. Побудова еквівалентної операторної схеми кола. Внутрішні й контурні операторні ЕРС.

4. Закони Ома й Кірхгофа в операторній формі. Операторні рівняння кола.

5. Можливі режими в колах другого порядку. Зв'язок коренів характеристичного рівняння кола й режиму, що виникає в ньому.

6. Особливості аперіодичного й коливального режимів.

7. Параметри вільних коливань: стала часу, тривалість і швидкість процесу.

Задачі необхідно розв'язувати за таким алгоритмом:

1. Аналіз умови задачі, особливостей схеми і початкових умов.

2. Короткий якісний аналіз процесів, що ґрунтується на аналізі фізики явищ, початкових умов і законів комутації.

3. Складання плану й ходу розв'язання задачі.

4. Solving the problem first in general, then numerically.

5. Analyzing the results obtained and stating the principal problem solution findings.

Solving problems

Problem 1

The circuit (Fig. 2.8.1) is given with parameters: $r_1 = 120 \Omega$; $r_2 = 360 \Omega$; $r_3 = 56 \Omega$; $C = 0,01 \mu\text{F}$; $E = 15 \text{ V}$.

To expect: $U_L(t)$; $i_1(t)$.

4. Розв'язання задачі спочатку в загальному вигляді, потім – у числовому вираженні.

5. Аналіз отриманих результатів і формулювання основних висновків розв'язання задачі.

Розв'язання задач

Задача 1

Дано схему (рис. 2.8.1) з параметрами: $r_1 = 120 \text{ Ом}$; $r_2 = 360 \text{ Ом}$; $r_3 = 56 \text{ Ом}$; $C = 0,01 \text{ мкФ}$; $E = 15 \text{ В}$.

Розраховуємо: $U_L(t)$; $i_1(t)$.

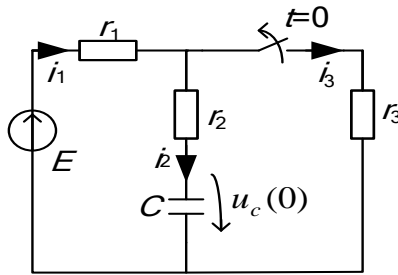


Fig. 2.8.1. The circuit diagram for problem 1
Рис. 2.8.1. Схема електричного кола для задачі 1

Solution

1. Designating the conditionally positive directions of currents and voltages.

2. Finding the independent initial conditions

3. Building an equivalent operator circuit (Fig. 2.8.2)

Розв'язання

1. Позначимо умовно-додатні напрямки струмів і напруг.

2. Знаходимо незалежні початкові умови

3. Будуємо еквівалентну операторну схему кола (рис. 2.8.2)

$$u_c(0) = u_c(0-) = E \frac{r_3}{r_1 + r_3}.$$

(mind that it is done for the post-commutation| circuit).

There is a reason to ask the question: Between which points of the equivalent operator circuit is the operator image of voltage across the capacitor determined?

Here we must point out the necessity to take account of the internal EMF when calculating the operator voltage across the capacitor.

(це стосується післякомутаційного кола).

Варто з'ясувати: між якими точками на еквівалентній операторній схемі визначається операторне зображення напруги на ємності.

Необхідно акцентувати увагу на потребі врахування внутрішньої ЕРС під час розрахунку операторної напруги на ємності.

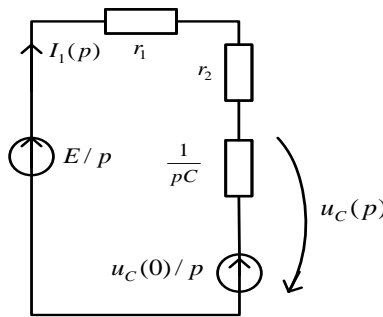


Fig. 2.8.2. Equivalent operator circuit for problem 1
Рис. 2.8.2. Еквівалентна операторна схема задачі 1

4. Setting up an operator equation for calculation of $I_1(p)$. For this purpose the formula of Ohm's law in the operator form is used

4. Складемо операторне рівняння для розрахунку $I_1(p)$. Для цього використовувати формулу закону Ома в операторній формі

$$I_1(p) = \frac{\frac{E}{p} - \frac{u_C(0)}{p}}{r_1 + r_2 + \frac{1}{pC}} = C \frac{E - u_C(0)}{p(r_1 + r_2)C + 1}$$

and reducing it to the tabular form. We get

і зведемо її до табличного вигляду. Отримуємо

$$I_1(p) = \frac{E - u_C(0)}{r_1 + r_2} \frac{1}{p + a},$$

where

$$a = \frac{1}{(r_1 + r_2)C} = \frac{1}{\tau}.$$

5. Using the Table for transition from operator images to the originals, we find

$$\frac{1}{p + a} = e^{-at},$$

i.e.

$$i_1(t) = \frac{E - u_C(0)}{r_1 + r_2} e^{-\frac{t}{(r_1 + r_2)C}} = \frac{r_1 E}{(r_1 + r_3)(r_1 + r_2)} e^{-\frac{t}{(r_1 + r_2)C}}.$$

6. Finding the operator voltage across the capacitor, using for this purpose the expression for the operator image of voltage across the capacitor obtained on the basis of the integration theorem:

$$u_C(p) = \frac{1}{pC} I_1(p) + \frac{u_C(0)}{p} = \frac{E - u_C(0)}{p[p(r_1 + r_2)C + 1]} + \frac{u_C(0)}{p}.$$

Reducing it to the tabular form, we get

$$u_C(p) = \frac{E - u_C(0)}{(r_1 + r_2)C} \cdot \frac{1}{p(p + a)} + u_C(0) \frac{1}{p}; \quad a = \frac{1}{(r_1 + r_2)C}.$$

7. Using the Table for transition from operator images to the originals, we find

5. Користуючись таблицею переходу від операторних зображень до оригіналів, маємо

тобто

6. Визначаємо операторну напругу на ємності, використовуючи для цього вираз для операторного зображення напруги на ємності, отриманого на підставі теореми інтегрування:

Зводимо його до табличного вигляду, отримавши

7. Користуючись таблицею переходу від операторних зображень до оригіналів, знаходимо

$$\frac{1}{p(p+a)} = \frac{1}{a} (1 - e^{-at}); \quad \frac{1}{p} = 1;$$

$$u_C(t) = [E - u_C(0)] \left(1 - e^{-\frac{t}{(r_1+r_2)C}} \right) + u_C(0) = E \left(1 - \frac{r_1}{r_1+r_3} e^{-\frac{t}{(r_1+r_2)C}} \right).$$

8. Numerical solution of this problem gives the following expressions for current and voltage

8. Розв'язуючи цю задачу в числовому значенні, отримуємо такі вирази для струму й напруги:

$$i(t) = 21.3e^{-0.208 \cdot 10^6 t}; \quad u(t) = 15[1 + 0.68e^{-0.208 \cdot 10^6 t}].$$

9. The diagrams of these functions are shown in Fig. 2.8.3 and 2.8.4.

9. Графіки цих функцій показано на рис. 2.8.3 і 2.8.4.

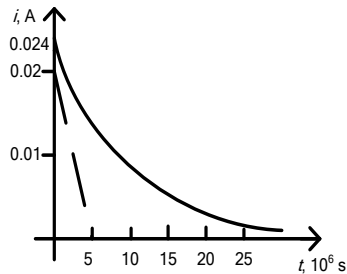
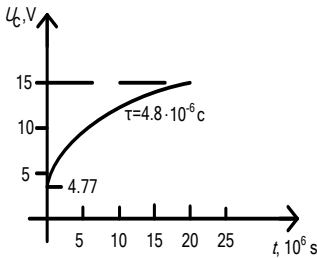


Fig. 2.8.3. Time diagram of voltage
Рис. 2.8.3. Часова діаграма напруги

Fig. 2.8.4. Time diagram of current
Рис. 2.8.4. Часова діаграма струму

Problem 2

The circuit (Fig. 2.8.5) is given with parameters:

$$R_i = 1,5 \text{ k}\Omega; \quad r = 10 \text{ }\Omega;$$

$$L = 150 \text{ mH}; \quad C = 6800 \text{ pF};$$

$$E = 12 \text{ V}.$$

Calculate $u_{os}(t)$.

Задача 2

Дано схему (рис. 2.8.5) з параметрами:

$$R_i = 1,5 \text{ к}\Omega; \quad r = 10 \text{ }\Omega;$$

$$L = 150 \text{ мГн}; \quad C = 6800 \text{ пФ};$$

$$E = 12 \text{ В}.$$

Розрахувати $U_K(t)$.

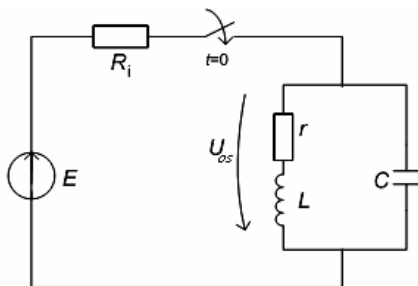


Fig. 2.8.5. The circuit diagram for problem 2
 Рис. 2.8.5. Схема електричного кола для задачі 2

Solution

1. This is a case with zero initial conditions. Build an equivalent operator circuit (Fig. 2.8.6).

Розв'язання

1. Відзначимо, що початкові умови є нульовими. Будемо еквівалентну операторну схему кола (рис. 2.8.6).

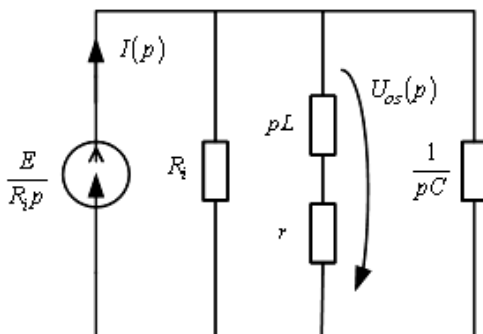


Fig. 2.8.6. Equivalent operator circuit for problem 2
 Рис. 2.8.6. Еквівалентна операторна схема задачі 2

2. Form an operator equation for the loop voltage $U_{os}(p)$. (It should be noted that here, unlike the classical method, operator equations of a circuit can be written for any value).

2. Складемо операторне рівняння щодо напруги на контурі $U_{к}(p)$ (складати операторні рівняння кола можна щодо будь-якої величини, на відміну від рекомендацій щодо класичного методу).

The equation will be formed using the node-voltage method

Для складання рівняння виберемо метод вузлових напруг:

$$Y(p)U_K(p) = I(p),$$

i.e.

тобто

$$\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{r + pL} + pC \right) U_K(p) = \frac{E}{R_i p}.$$

Transform the bracketed term in the left part of the expression to the form of two polynomials

Перетворимо вираз у дужках в лівій частині у відношення двох поліномів

$$\begin{aligned} \frac{r + pL + R_i + pC(r + pL)R_i}{R_i(r + pL)} &= \frac{r + R_i + (L + rR_iC)p + LCR_i p^2}{R_i(r + pL)} = \\ &= C \frac{p^2 + \frac{L + rCR_i}{LCR_i} p + \frac{r + R_i}{LCR_i}}{p + \frac{r}{L}}. \end{aligned}$$

Introducing the generally accepted denotations

Уведемо загальноприйняті позначення:

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{L + rCR_i}{LCR_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{CR_i} + \frac{r}{L} \right) = 49 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{r + R_i}{LCR_i}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r}{R_i} + 1} = 31,4 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1};$$

$$2\delta_1 = \frac{r}{L} = 0,067 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}.$$

(The calculations should be carried out with engineering tools).

(Розрахунки варто виконувати за допомогою технічних засобів).

As $\delta > \omega_0$, there is the aperiodic regime a circuit. Taking into account the introduced denotations, we get

Оскільки $\delta > \omega_0$, то в колі настає аперіодичний режим. З урахуванням позначень маємо

$$C \frac{p^2 + 2\delta p + \omega_0^2}{p + 2\delta_1} U_K(p) = \frac{E}{R_i p}.$$

Hence,

Звідси

$$U_K(p) = \frac{E}{R_i C} \frac{p + 2\delta_1}{p(p^2 + 2\delta p + \omega_0^2)} = \frac{E}{R_i C} \frac{F_1(p)}{p F_3(p)}.$$

3. Find the original of the loop voltage (use the decomposition formula for the case of zero root)

3. Знаходимо оригінал напруги на контурі (за допомогою формули розкладання для випадку з нульовим коренем)

$$U_{os}(p) = \frac{E}{R_i C} \left[\frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \sum_{k=1}^2 \frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)} e^{p_k t} \right].$$

Define all the values included in this formula

Визначимо всі величини, що входять у цю формулу:

$$\frac{E}{R_i C} = \frac{12}{1500 \cdot 6800 \cdot 10^{-12}} = 1.18 \cdot 10^6.$$

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = (-49 \pm 37.6) \cdot 10^3 = \begin{cases} -11.4 \cdot 10^3 \\ -88.6 \cdot 10^3 \end{cases}$$

$$\frac{F_1(0)}{F_3(0)} = \frac{2\delta_1}{\omega_0^2} = \frac{0.067 \cdot 10^3}{(31.4)^2 \cdot 10^6} = 0.068 \cdot 10^{-6}$$

$$F_1(p) = p + 2\delta_1 = p + 0.067 \cdot 10^3; \quad F_3'(p) = 2(p + \delta) = 2(p + 49 \cdot 10^3);$$

$$\frac{F_1(p_1)}{p_1 F_3'(p_1)} = \frac{-11.4 \cdot 10^3 + 0.067 \cdot 10^3}{-11.4 \cdot 10^3 \cdot 2(-11.4 \cdot 10^3 + 49 \cdot 10^3)} = \frac{-11.3}{-857 \cdot 10^3} = 13.2 \cdot 10^{-6};$$

$$\frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} = \frac{-86.6 \cdot 10^3 + 0.067 \cdot 10^3}{-86.6 \cdot 10^3 \cdot 2(-86.6 \cdot 10^3 + 49 \cdot 10^3)} = \frac{-86.5}{651 \cdot 10^4} = -13.3 \cdot 10^{-6}.$$

Substituting the found values to the decomposition formula, we get the final result

Підставляючи знайдені величини у формулу розкладання, дістаємо остаточний результат:

$$\begin{aligned}
 u_{os}(t) &= 1,18 \cdot 10^6 (0,068 \cdot 10^{-6} + 13,2 \cdot 10^{-6} e^{-11,4 \cdot 10^3 t} - \\
 &- 13,3 \cdot 10^{-6} e^{-11,4 \cdot 10^3 t} - 13,3 \cdot 10^{-6} e^{-86,6 \cdot 10^3 t}) = \\
 &= 0,08 + 15,6 e^{-11,4 \cdot 10^3 t} - 15,7 e^{-86,6 \cdot 10^3 t}.
 \end{aligned}$$

4. Constructing a diagram. 4. Будуємо графік. Стала ча-
 Time constant of the first and су першої та другої експонент
 second exponents

$$\tau_1 = \frac{1}{11,4 \cdot 10^3} = 87,7 \cdot 10^{-6}, \quad \tau_2 = \frac{1}{86,6 \cdot 10^3} = 11,5 \cdot 10^{-6}.$$

According to the chosen time scale, build the diagram of vol- Таб, будуємо графік напруги
 tage $u_{os}(t)$ (Fig. 2.8.7). $U_K(t)$ (рис. 2.8.7).

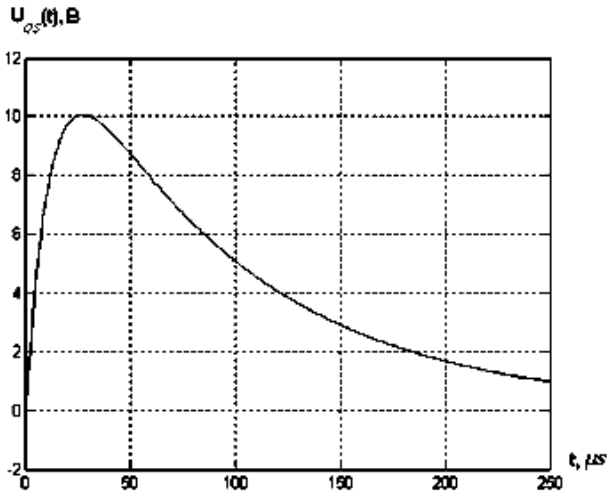


Fig. 2.8.7. Time diagram of voltage $u_{os}(t)$
 Рис. 2.8.7. Часова діаграма напруги $U_K(t)$

Homework

The problem to be solved re-
 lies on the circuit from the pre-
 vious problem 2 (Fig. 2.8.8). The

Домашнє завдання

В основу завдання покладе-
 но дослідження кола (рис. 2.8.8)
 із попередньої задачі 2. Різниця

only difference is that in this case the switch breaks the circuit. лише в тім, що ключ працює на розмикання:

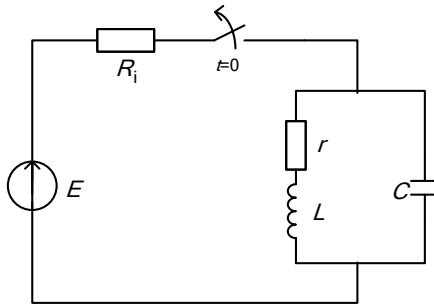


Fig. 2.8.8. The circuit diagram for homework

Рис. 2.8.8. Схема електричного кола для домашнього завдання

It is given:

$$R_i = 1,5 \text{ k}\Omega; r = 10 \text{ }\Omega;$$

$$L = 150 \text{ mH}; E = 12 \text{ V};$$

$$C = 6800 \text{ pF}.$$

Calculate: $u_{os}(t)$, τ , t_{tr} , Θ ,

$$f_{free}.$$

It is necessary to take into account when making the solution of the offered problem, that this task is intended for working off characteristics and parameters of free oscillators.

Дано:

$$R_i = 1,5 \text{ k}\Omega; r = 10 \text{ }\Omega;$$

$$L = 150 \text{ мГн}; C = 6800 \text{ пФ};$$

$$E = 12 \text{ В}.$$

Розрахувати: $u_K(t)$, τ , $t_{пер}$,

$$\Theta, f_B.$$

Завдання призначено для відпрацювання характеристик і параметрів вільних коливань.

BASIC LITERATURE

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Карлащук В. И.* Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение / В. И. Карлащук. – М. : Солон-Р, 2000. – 506 с.

2. *Бабак В. П.* Цифрові вимірювальні прилади: комп'ютерний лабораторний практикум / В. П. Бабак, В. С. Єременко, Ю. В. Куц, В. М. Мокійчук. – К. : Книжкове вид-во НАУ, 2006. – 168 с.

3. *П'яних Б. Є.* Аналіз електричних кіл. Розрахунок стаціонарних режимів: навч. посіб. / Б. Є. П'яних, Є. В. Мельников, С. О. Животовський. – К. : КМУЦА, 1999. – 184 с.

4. *Попов В. П.* Основы теории цепей: учеб. для вузов спец. «Радиотехника» / В. П. Попов. – М. : Высш.шк., 1998. – 575 с.

5. *П'яних Б. Є.* Основы теории кіл. Перехідні процеси в електричних колах. Чотириполюсники. Фільтри: навч. посіб. / Б. Є. П'яних. – К. : КМУЦА, 2000. – 184 с.

LIST OF BASIC TERMS

СПИСОК ТЕРМІНІВ

Admittance (mutual a., self-a. of node)	Комплексна провідність (взаємна, власна провідність вузла)
Ampere (A)	Ампер (A)
Amplitude	Амплітуда
Attenuation	Загасання
Attenuation coefficient	Коефіцієнт загасання
Axis	Ось
Band (attenuation b., suppression b., transmission b.)	Смуга (загасання; подавлення; пропускання)
Bandwidth	Смуга пропускання
Bandwidth shape factor	Коефіцієнт прямокутності
Boundaries of transmission band	Межі смуги пропускання
Branch (longitudinal b., cross b.)	Гілка (поздовжна, поперечна)
Branching	Розгалуження
Break	Розрив
Capacitance (static, dynamic)	Ємність (статична, динамічна)
Capacitor	Конденсатор
Carrier	Носій
Cartesian (rectangular) coordinate system	Декартова (прямокутна) система координат
Characteristic (amplitude frequency c. (AFC), charge-voltage c., flux-current c., image frequency c. (IFC) impulse c., normalized c.; phase frequency c. (PFC), real frequency c. (RFC), time c., transient c.)	Характеристика (амплітудно-частотна (АЧХ), кулон-вольтна, вебер-амперна, уявно-частотна (УЧХ), імпульсна, нормована, фазочастотна (ФЧХ), дійсно-частотна (ДЧХ), часова, передатна)
Characteristic impedance	Характеристичний опір
Characteristic parameter	Характеристичний параметр
Characteristic transfer ratio	Характеристичний коефіцієнт передачі

Charge (positive, negative)	Заряд (додатний, від'ємний)
Chord	Хорда
Circuit (first order c., second order c.)	Коло електричне (першого порядку, другого порядку)
Coils are connected aiding	Котушки, з'єднані узгоджено
Coils are connected in opposition	Котушки, з'єднані зустрічно
Column (in matrix)	Стовпець (матриці)
Communication line	Лінія зв'язку
Commutation law	Закон комутації
Complex admittance	Комплексна провідність
Complex conjugate number	Комплексно спряжене число
Complex current transfer ratio	Комплексний коефіцієнт передачі за струмом
Complex impedance	Комплексний опір
Complex input admittance	Комплексна вхідна провідність
Complex input impedance	Комплексний вхідний опір
Complex transfer admittance	Комплексна передатна провідність
Complex number	Комплексне число
Complex transfer impedance	Комплексний передатний опір
Complex voltage transfer ratio	Комплексний коефіцієнт передачі за напругою
Condition (initial c., resonance c.)	Умови (початкові, резонансна)
Condition (steady-state c., transient c.)	Режим (усталений, перехідний)
Conductance	Провідність
Connection (series c., parallel c., delta c., star c., regular c., non-regular c.)	З'єднання (послідовне, паралельне, трикутником, зіркою, регулярне, нерегулярне)
Constant of integration	Стала інтегрування
Consumer	Споживач
Convolution integral	Інтеграл згортки
Coulomb (C)	Кулон (Кл)
Coupling (frequency-independent c., weak c., strong c., inductive c.,	Зв'язок (частотонезалежний, слабкий, сильний, індуктивний, ємні-

capacitive c., resistance c., external capacitive c, internal capacitive c, combined c.)
Cross-section
Current (direct, alternating, harmonic)
Device
Derivative of any order
Decrement coefficient
Deturning (absolute d., factor d., generalized circuit d., relative d.)
Diagram
Djuamel's integral

Edge
Efficiency
Electricity
Electromotive force (EMF)
Electronics
Energy (thermal, mechanical, light)
Equation (differential e., characteristic e.)
Factor of coupling
Farad (F)
Field (electric, magnetic, electromagnetic)
Filter (band-pass f. (BPF), constant- "k" f., high-pass f. (HPF), low-pass f. (LPF), "m"-derived f., rejection f. (RF))
Four – terminal circuit (active, autonomous (non-controlled), linear, nonautonomous (controlled), nonlinear, nonreciprocal, nonsymmetricak,

сний, резистивний, зовнішній ємнісний, внутрішній ємнісний, комбінований)
Перетин
Струм (постійний, змінний, гармонічний)
Пристрій (апарат, прилад)
Похідна будь-якого порядку
Коефіцієнт затухання
Розлад (абсолютний, фактор розладу, узагальнений розлад коливального контуру, відносний)
Схема (електричного кола)
Інтеграл Дюамеля
Ребро
Коефіцієнт корисної дії
Електрика
Електрорушійна сила (ЕРС)
Електроніка
Енергія (теплова, механічна, світлова)
Рівняння (диференціальне, характеристичне)
Коефіцієнт зв'язку
Фарада (Ф)
Поле (електричне, магнітне, електромагнітне)
Фільтр (смуговий, типу «k», високої частоти (ФВЧ), низької частоти (ФНЧ), типу «m», режекторний)
Чотириполюсник (активний, автономний (неконтрольований), лінійний, неавтономний (контрольований), нелінійний, невзаємний, несиметричний, прохідний, пасивний,

passage, passive, reciprocal, symmetrical)	взаємний, симетричний)
Frequency (angular f., resonance f., natural f. of oscillatory circuit, limiting f., natural cut-off f.)	Частота (кутова, резонансна, власна коливального контуру, гранична, власна частота зрізу)
Function (unit step f., delta-f.)	Функція (одинична , дельта-функція)
Frequency locus	Частотний годограф
Frequency selective circuit	Частотно-вибіркове коло
Generator	Генератор
Geometric figure	Геометрична фігура
Graph (direct, connected)	Граф (направлений, зв'язний)
Graph tree	Дерево графу
Henry (H)	Генрі (Гн)
Image	Зображення
Impulse effect	Імпульсний вплив
Inclusion coefficient	Коефіцієнт увімкнення
Inductance (static, dynamic)	Індуктивність (статична, динамічна)
Inductance coil	Котушка індуктивності
Induction	Індукція
Integral (multiple i., <i>n</i> -fold multiple i.)	Інтеграл (кратний, <i>n</i> -кратний)
Interlinkage	Потокозчеплення
Joule (J)	Джоуль (Дж)
Jump (voltage, current)	Стрибок (напруги, струму)
K-conversion (direct, inverse)	К-перетворення (пряме, обернене)
Laplace's transformation (direct, revers)	Перетворення Лапласа (пряме, обернене)
Line (in matrix)	Рядок (матриці)
Loop (eliminable)	Контур (усувний)
Loop current	Контурний струм
Loop current matrix	Матриця контурних струмів
Loop current method	Метод контурних струмів
Loop EMF	Контурна ЕРС
Loop EMF matrix	Матриця контурних ЕРС

Loop resistance matrix	Матриця контурних опорів
Magnetic-flux	Магнітний потік
Matching condition	Умови узгодження
Matrix (topological m., incidence m., node m., loop m., section m.)	Матриця (топологічна, інциденцій, вузлів, перетинів)
Measurement of short circuit	Вимірювання в режимі короткого замикання
Method (classical m., operator m.)	Метод (класичний , операторний)
Module	Модуль
Mutual inductance	Взаємна індуктивність
No-load measurement	Вимірювання в режимі холостого ходу
Node (eliminable)	Вузол (усувний)
Node admittance matrix	Метод вузлових напруг
Node current	Вузловий струм
Node current matrix	Матриця вузлових струмів
Node voltage	Вузлова напруга
Node voltage matrix	Матриця вузлових напруг
Nodal voltage method	Матриця вузлових провідностей
Normalization	Нормування
Normalized	Нормований
Ohm (Om)	Ом (Ом)
Original	Оригінал
Oscillatory circuit (primary o.s., secondary o.s.)	Коливальний контур (первинний, вторинний)
Parameter (no-load p., shot-circuit p., one-side p., primery p., secondary p.)	Параметр (холостого ходу, короткого замикання, однобічний, первинний, вторинний)
Period	Період
Phase (oscillation p., initial p. shift f.)	Фаза (коливань, початкова, зсув фази)
Phase lag	Відставання за фазою
Phase lead	Випередження за фазою
Plane	Площина
	Потенціал

Potential	Потужність (активна, реактивна, комплексна)
Power (active, reactive, complex)	Умови балансу потужності
Power balance condition	
Q-factor (of oscillatory circuit)	Добротність (коливального контуру)
Radian (rad)	Радіан (рад)
Radio	Радіо
Reactance (inductive r., capacitive r.)	Реактивний опір (індуктивний, ємнісний)
Resistance	Активний опір
Resistance (static, dynamic)	Опір (статичний, динамічний)
Resistance (mutual r., self-r. of loop, added r.)	Опір (взаємний, власний опір контуру, внесений)
Resistor	Резистор
Resonance (voltage r., current r., neutral r.)	Резонанс (напруг, струмів, бай-дужий)
Resonance (first particular r., second particular r. main or individual r.)	Резонанс (перший частковий, другий частковий, основний або індивідуальний)
Scalar	Скаляр
Scale (s. frequency factor, s. impedance factor)	Масштаб (масштабний частотний коефіцієнт, масштабний коефіцієнт опору)
Second (s)	Секунда (с)
Section line surface	Січна
Self-induction	Самоіндукція
Shift	Зсув
Shunt	Шунт, шунтувати
Siemens (S)	Сіменс (См)
Signal distortion	Спотворення сигналу
Source (voltage s., current s., independent or self-contained s., dependent or non-self-contained s.)	Джерело (напруги, струму, незалежне або автономне, залежне або неавтономне)
Subgraph	Підграф

Susceptance (inductive s., capacitive s.)	Реактивна провідність (індуктивна, ємнісна)
Surface	Поверхня
System of coupled oscillatory circuit	Система зв'язаних коливальних контурів
Switching	Увімкнення
Terminal (input, output)	Клема, затискач (вхідна, вихідна)
Theorem (superposition t., mutuality t., compencation t., equivalent generator t.)	Теорема (принцип суперпозиції, взаємності, принцип компенсації, про еквівалентний генератор)
Topology	Топологія
Transfer function	Функція передачі
Transient process	Перехідний процес
Transfer ratio	Коефіцієнт передачі
Turn	Виток
Turn operator	Оператор обертання
Value (mean or average v., root-mean-square v., mean rectified v., instantaneous v., effective v.)	Величина (середня, середньоквадратична, середньовипрямлена, миттєва, ефективна)
Vector	Вектор
Voltage	Напруга
Watt (W)	Ват (Вт)
Wave	Хвиля
Wave or characterictic impedance	Хвильовий або характеристичний опір
Weber (Wb)	Вебер (Вб)