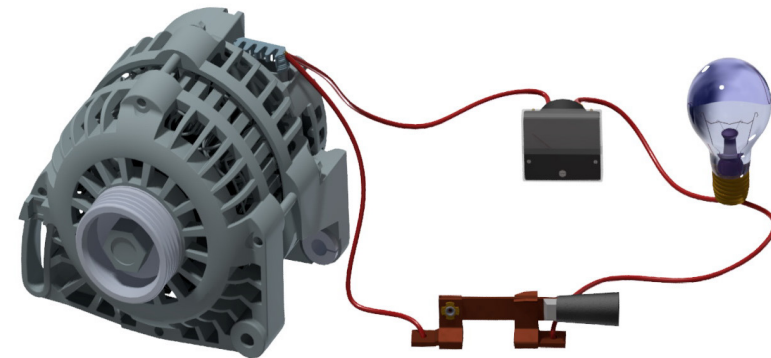
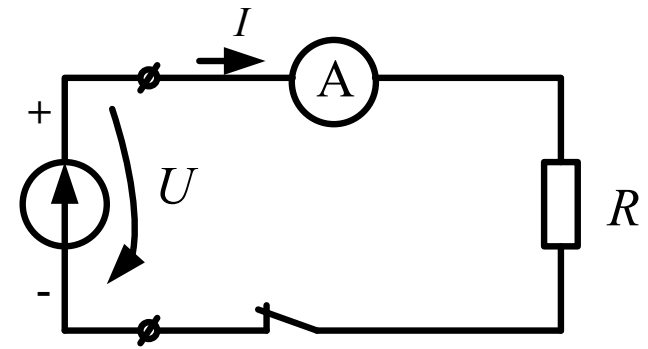


В. Г. Мадьяров, А. М. Коваль, І. К. Говор

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
ЧАСТИНА 2



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. Г. Мадьяров, А. М. Коваль, І. К. Говор

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
ЧАСТИНА 2**

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Вінниця
ВНТУ
2018

УДК 621.3.01(075)

М13

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 23.02.2017 р.)

Рецензенти:

А. Я. Кулик, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

П. Д. Лежнюк, доктор технічних наук, професор

Мадьяров, В. Г.

М13 Теоретичні основи електротехніки. Частина 2 : лабораторний практикум / Мадьяров В. Г., Коваль А. М., Говор І. К. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 120 с.

В посібнику розглянуто перехідні процеси в лінійних електричних колах, усталені режими роботи нелінійних кіл постійного та змінного струму, кіл з розподіленими параметрами та електромагнітне поле, а також подано методичні вказівки для їх практичного закріплення шляхом проведення лабораторних робіт, що відносяться до другої частини дисципліни «Теоретичні основи електротехніки».

УДК 621.3.01(075)

Зміст

Правила виконання лабораторних робіт з теоретичних основ електротехніки	4
Правила техніки безпеки виконання лабораторних робіт в лабораторіях кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань	5
Опис лабораторного обладнання.....	6
Інструкція для використання віртуальної електронної лабораторії Electronics Workbench	8
Лабораторна робота № 16 Перехідні процеси в лінійних електричних колах.....	12
Лабораторна робота № 16А Перехідні процеси в колах $r - L$ та $r - C$	19
Лабораторна робота № 16АВВ Перехідні процеси в лінійних електричних колах першого порядку.....	23
Лабораторна робота № 16Б Перехідні процеси в послідовному колі $r-L-C$	26
Лабораторна робота № 16ВВВ Перехідні процеси в лінійних електричних колах другого порядку	27
Лабораторна робота № 16ВВВВ Перехідні процеси в електричних колах при довільних збудженнях	29
Лабораторна робота № 17 Нелінійні кола постійного струму	37
Лабораторна робота № 17А Розгалужене нелінійне коло постійного струму	44
Лабораторна робота № 17Б Параметричний стабілізатор постійної напруги	46
Лабораторна робота № 18 Дослідження котушки з феромагнітним сердечником.....	50
Лабораторна робота № 19 Ферорезонанс напруг.....	58
Лабораторна робота № 20 Однофазний трансформатор з феромагнітним сердечником	64
Лабораторна робота № 21ВВВ Дослідження найпростіших випрямлячів змінного струму	71
Лабораторна робота № 22 Дослідження однорідної довгої лінії	85
Лабораторна робота № 23 Дослідження магнітного поля циліндричної котушки без магнітопроводу.....	94
Лабораторна робота № 24 Дослідження переломлення силових ліній стаціонарного електричного поля на границі розділу двох середовищ.....	101
Лабораторна робота № 25 Моделювання електричного поля двопровідної лінії на електропровідному папері.....	107
Лабораторна робота № 26 Дослідження електричного поля кульового заземлювача	113
Словник іншомовних термінів.....	116
Література	119

ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

1. До виконання кожної лабораторної роботи студенти повинні готуватися заздалегідь. В процесі підготовки необхідно ознайомитись з описом лабораторної роботи, обладнанням лабораторного стенду, вивчити теоретичний матеріал і методику проведення вимірювань. Під час підготовки до майбутньої лабораторної роботи кожен студент повинен скласти бланк-протокол, де в тій же послідовності, що в описі до лабораторної роботи, вказати мету роботи, короткі відомості з теорії і розрахункові формули, необхідні при обробці результатів дослідження, а також порядок виконання роботи, включно зі схемами кіл і таблицями.

2. Виконання лабораторних робіт дозволяється студентам, які пройшли співбесіду на допуск до роботи або програмований контроль підготовленості. Лабораторні роботи виконуються бригадами по 2–3 студенти кожна.

3. Виконуючи роботу, студенти самостійно виконують монтаж кіл за схемами, наведеними у вказівках. Після складання кола студенти повинні показати його викладачу або лаборанту для контролю правильності монтажу. Вмикати коло під *напругу (voltage)* до перевірки її викладачем або лаборантом забороняється!

4. Результати вимірювань заносяться до таблиць бланків-протоколів спочатку олівцем, а після перевірки їх правильності – чорнилом. Студенти повинні самостійно контролювати правильність вимірювань та усувати помилки за їх наявності. Закінчивши вимірювання на одному з досліджуваних кіл, до того як його розібрати, студенти повинні показати результати вимірювань викладачу.

5. Наприкінці роботи результати вимірювань подаються викладачеві на підпис, після чого з дозволу викладача проводиться демонтаж останнього з досліджуваних кіл. Закінчивши роботу, студенти наводять порядок на робочому місці і повертають лаборанту прилади.

6. До наступної лабораторної роботи кожен студент зобов'язаний оформити звіт про попередню лабораторну роботу. Звіт виконується на основі розрахунків, експериментальні дані яких обробляються згідно з описом до лабораторної роботи. Студенти, які не підготували звіт про виконану раніше роботу або не підготовлені до виконання наступної, до роботи не допускаються.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ В ЛАБОРАТОРІЯХ КАФЕДРИ ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

1. До проведення лабораторних робіт допускаються тільки студенти, що знають правила техніки безпеки. Інструктаж з техніки безпеки проводить викладач на першому лабораторному занятті.
2. Під час монтажу схем використовують ізольовані провідники. Використовувати неізольований провід **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ!**
3. Студенту **КАТЕГОРИЧНО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ** вмикати схему без її перевірки лаборантом або викладачем.
4. Усунення помічених в робочій схемі несправностей, а також всі перез'єднання, необхідні під час роботи, виконуються тільки за вимкненої напруги.
5. Якщо в схемі є конденсатори, то їх обов'язково необхідно розрядити.
6. Під час роботи не можна торкатись до оголених частин електричних схем.
7. Запобіжники, які перегоріли, замінює лаборант.
8. При з'єднанні схеми з джерелом електричної енергії студент, виконуючий вмикання, повинен про це попередити всіх членів бригади словом «**вмикаю!**».

ОПИС ЛАБОРАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ

Лабораторний стенд постійного струму являє собою універсальну установку, яка живиться від двох акумуляторів.

На стенді в центрі змонтовано вихідні полюси *джерел напруги (voltage source)* E_1 і E_2 з внутрішніми опорами r_{01} і r_{02} , гнізда клем для підключення провідників, опорів r_1 – r_5 та приладів.

Висувні блоки зліва і справа від центральної частини в лабораторних роботах частини 1 зазвичай не використовуються.

Зовнішній вигляд цього стенду подано на рисунку 1. На стенді постійного *струму (current)* виконуються роботи № 1–5.

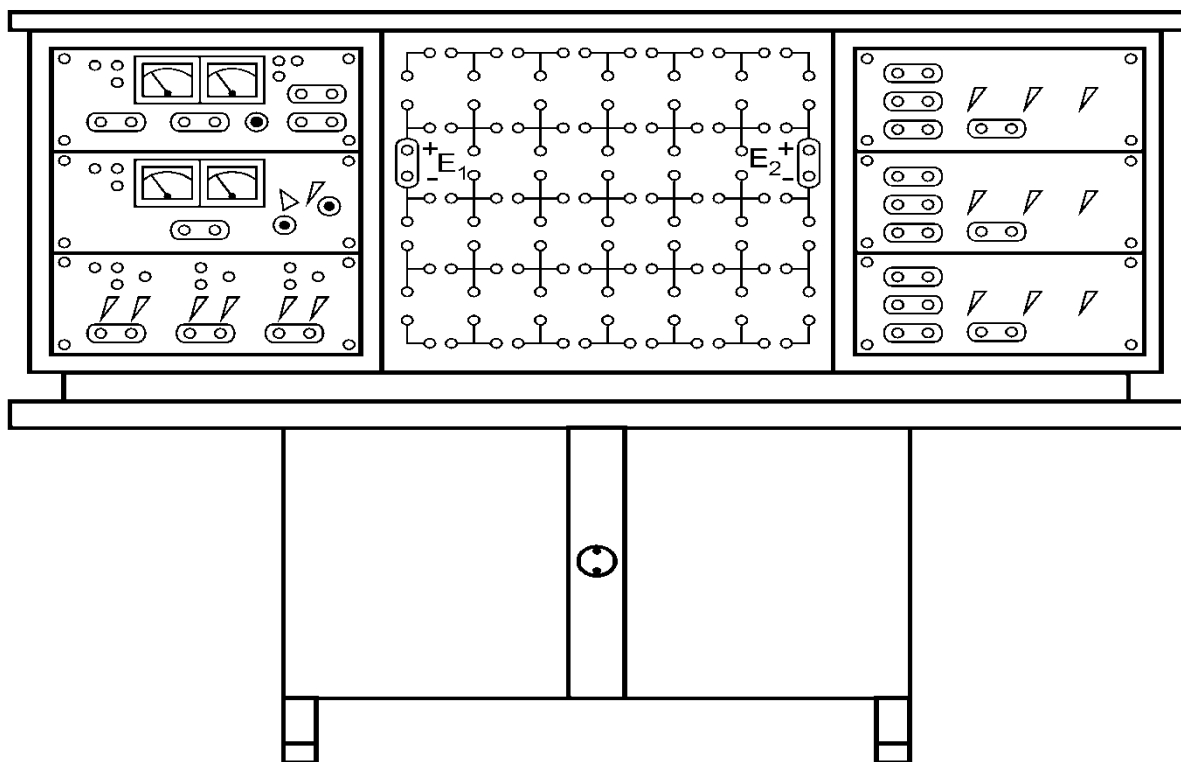


Рисунок 1

Лабораторний стенд змінного струму (рис. 2) виготовлений як універсальна установка типу ЛЕС-4 з висувними блоками.

В центральній частині стенда змонтоване трифазне навантаження, кожна фаза якого складається з п'яти ламп розжарювання, ввімкнених паралельно. Число ламп в кожній фазі можна змінювати за допомогою перемикачів.

Висувні блоки знаходяться зліва і справа від центральної частини. Зверху розташований блок конденсаторів та блок трифазного *трансформатора (transformer)* 220/12В; знизу – блок *резисторів (resistor)* і блок з *діодами (diode)*.

До кожного стенда додаються котушки *індуктивності (inductance)*, реостат, автотрансформатор, вимірювальні прилади, а також інші прилади, необхідні для виконання лабораторних робіт.

Стенд живиться електричною енергією від трифазної мережі з лінійною напругою 220 В, фази якої А, В, С з нульовим провідником виведені на лицьову панель стенда і знаходяться праворуч від центральної частини. Крім того, на лицьову панель стенда виведено також однофазну напругу 220 і 127 В.

Живлення стенда постійним струмом передбачено від *випрямляча (rectification circuit)*, вмонтованого в блоці з діодами.

Стенд під напругу вмикається пакетним перемикачем «Мережа», розташованим зліва від центральної частини стенда.

На стенді змінного струму виконуються роботи № 6–21.

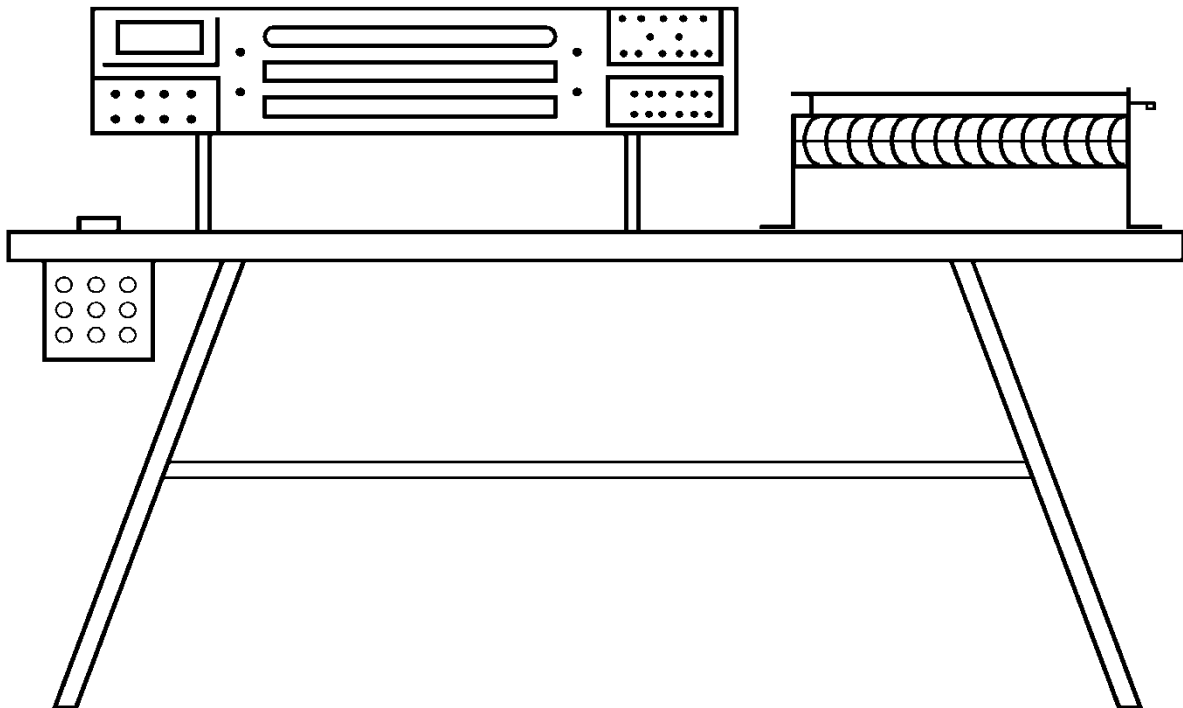


Рисунок 2

ІНСТРУКЦІЯ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ЛАБОРАТОРІЇ ELECTRONICS WORKBENCH

Загальні положення

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

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

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

Для операцій із компонентами на загальному полі Electronics Workbench виділено дві області: панель компонентів і поле компонентів (рис. 3).

Панель компонентів складається з піктограм полів компонентів, поле компонентів – з умовних зображень компонентів. Клацнувши мишею на одну з одинадцятьох піктограм, розташованих на панелі, можна відкрити відповідне поле. На рис. 1 відкрито поле пасивних компонентів (Passive). Розташування елементів у полях орієнтовано на те, як часто використовується компонент. Більш детально бібліотеки Electronics Workbench описані у [5].

При моделюванні аналогових, цифрових і цифроаналогових кіл досліджувана схема складається на робочому полі при одночасному використанні миші і клавіатури. Застосування в роботі тільки клавіатури неможливо. При побудові і редагуванні схем виконуються такі операції: вибір компонента з бібліотеки компонентів; виділення об'єкта; переміщення об'єкта; копіювання об'єктів; вилучення об'єктів; з'єднання компонентів схеми провідниками; установлення значень компонентів; приєднання приладів. Якщо схема не розміщується на екрані монітора, будь-яку її ділянку можна переглянути за допомогою лінійок прокручування, розташованих справа і під робочим полем.

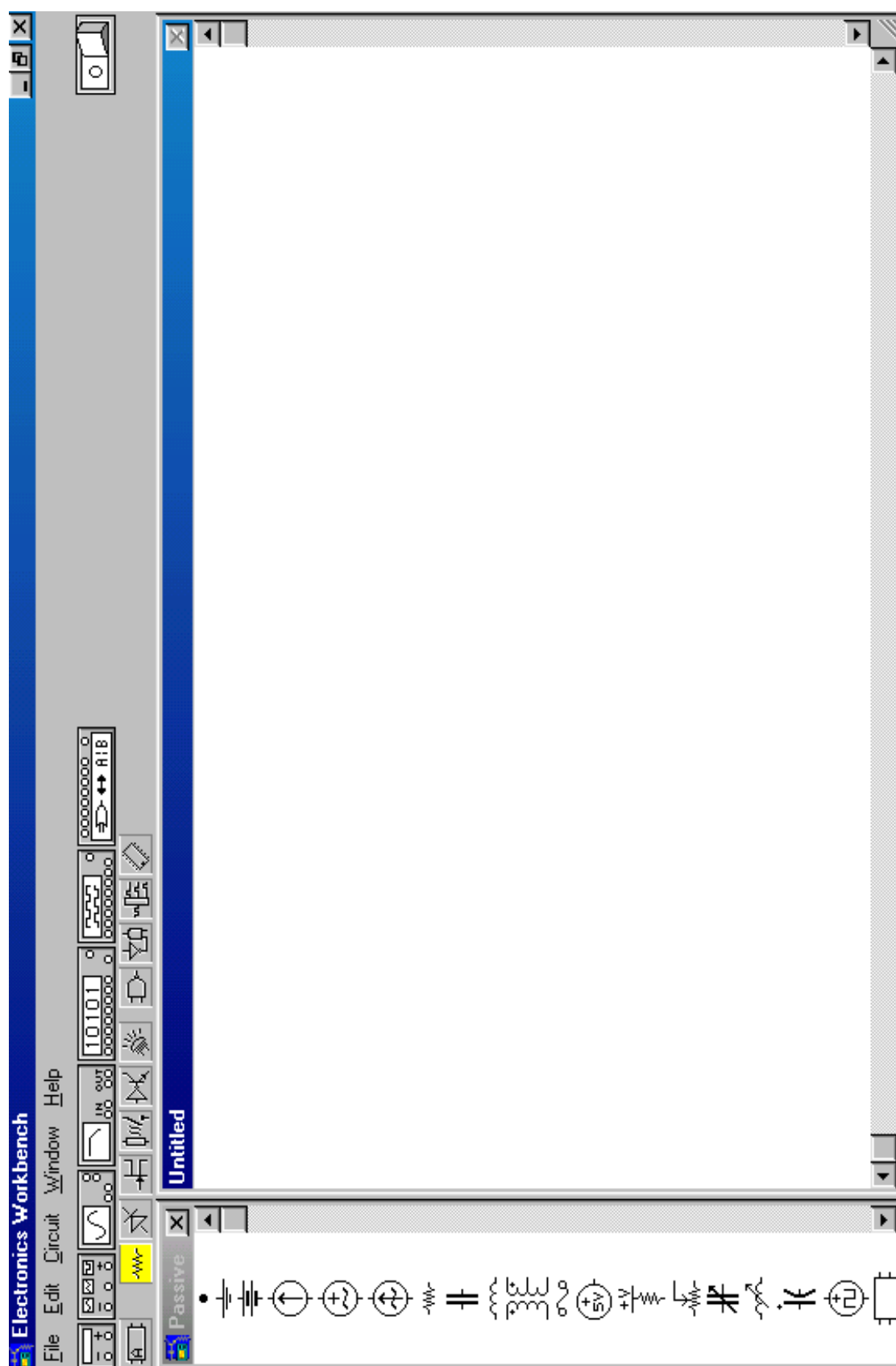


Рисунок 3 – Головне поле Electronics Workbench

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

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

Після вибору поля компонентів потрібний компонент за допомогою миші переміщується на робоче поле. Виділення об'єкта здійснюється за допомогою миші («об'єктом» може бути як один компонент, так і група компонентів). При виборі компонента потрібно встановити курсор миші на потрібний компонент і клацнути лівою кнопкою миші. Для вибору групи компонентів потрібно встановити курсор миші в один із кутків прямокутної області, що містить групу, і, натиснувши ліву кнопку миші, розтягнути рамку до необхідних розмірів, після чого відпустити кнопку. Обраний об'єкт змінює свій колір на червоний.

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

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

Всі провідники в Electronics Workbench за замовчуванням будуть чорного кольору, але колір провідника можна змінити. Для цього потрібно подвійним клацанням миші на зображенні провідника відкрити вікно, наведене на рис. 4, і у вікні мишею вибрати необхідний колір. Якщо в схемі компоненти розміщені неакуратно, то може знадобитися спрямити провідники, що з'єднують компоненти. Це можна зробити, перемістивши компоненти так, щоб провідники зображалися прямими лініями.



Рисунок 4

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

У Electronics Workbench є сім приладів, що формують різні впливи й аналізують реакцію схеми. Ці прилади подані у вигляді піктограм, розташованих на панелі інструментів. Для підімкнення приладу до схеми потрібно мишею перетягнути прилад із панелі інструментів на робоче поле і приєднати виводи приладу до досліджуваних точок. Деякі прилади потрібно заземлювати, інакше їхні показання будуть помилковими. Розширене зображення приладу виводиться у вікні, що з'являється після подвійного клацання мишею по зменшеному зображенню приладу або після виконання команди Zoom із меню Circuit. Закрити це вікно можна командою Close із меню, що з'являється при клацанні на кнопці в лівому верхньому кутку вікна. Також можна використовувати комбінацію Alt+F4.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Мета роботи – дослідити *перехідні процеси (transient)* в нерозгалужених колах першого та другого порядків.

Теоретичні відомості

Процес переходу *електричного кола (electric circuit)* від одного сталого режиму до іншого, який характеризується новим енергетичним станом, називається *перехідним*.

Зміну режиму роботи кола, що веде до зміни його енергетичного стану, називають *комутацією (connection)*. До комутації відносяться: вмикання, вимикання, замикання на ділянках кола і т. п. Вважається, що комутація проходить миттєво. В загальному випадку процеси переходу від одного енергетичного стану кола до іншого не можуть проходити миттєво, тому що не можливі миттєві зміни енергії, що є в реактивних елементах кола.

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

Енергія *магнітного поля (magnetic field)* котушки з індуктивністю L та *електричного поля (electric field)* конденсатора з ємністю (*capacity*) C визначається співвідношеннями:

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

Оскільки не можливі миттєві зміни енергії W_M і W_E , не можливі стрибки струму в індуктивності і напруги на ємності.

Це положення визначає *закони комутації (connection laws)*, котрі записуються так:

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

де $i_L(0_-)$, $u_C(0_-)$ – струм в індуктивності і напруга на ємності в першій мить до комутації;

$i_L(0_+)$, $u_C(0_+)$ – ті ж величини в перший момент після комутації.

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

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

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

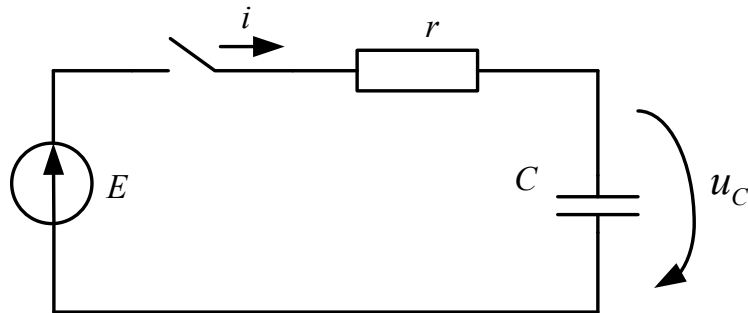


Рисунок 16.1

Запишемо для кола з *послідовно з'єднаними (serial connection)* активним опором (*active resistance*) та ємністю, що вмикається до постійної електрорушійної сили (ЕРС) (*electromotive force*) – E , рівняння за другим законом Кірхгофа (*Kirchhoff voltage law*) для $t \geq 0$;

$$ir + u_c = E.$$

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

$$rC \frac{du_c}{dt} + u_c = E. \quad (16.4)$$

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

$$u_c = u_{Cnp} + u_{Cв}, \quad (16.5)$$

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

Примусова складова визначається як напруга на ємності після закінчення перехідного процесу. В цьому випадку ємність буде заряджатись до тих пір, поки напруга на ній не буде дорівнювати E , тобто $u_{Cnp} = E$.

Вільна складова

$$u_{Cв} = Ae^{pt}, \quad (16.6)$$

де A – стала інтегрування, яка визначається з *початкових умов (initial conditions)*, p – корінь *характеристичного рівняння (defining equation)*:

$$rCp + 1 = 0;$$

звідки $p = \frac{-1}{r \cdot C}$.

Підставляючи знайдені величини $u_{\text{сnp}} = E$ та $p = \frac{-1}{r \cdot C}$ в рівняння (16.5), отримаємо:

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

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

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

звідки $A = -E$.

Остаточно напруга на ємності як функція часу має вигляд

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

Позначимо $rC = \tau$, де τ – стала часу (*time constant*).

Тоді

$$u_C = E - Ee^{-t/\tau}. \quad (16.10)$$

Графічно ця залежність зображена на рис. 16.2

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

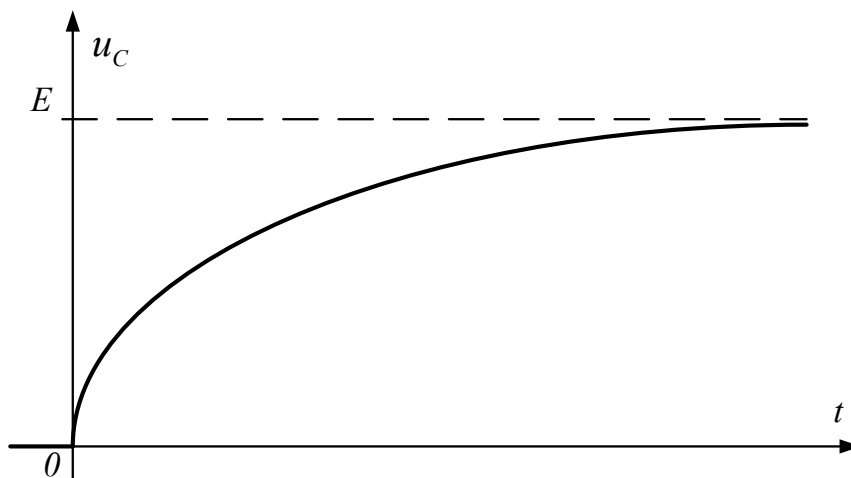


Рисунок 16.2

Струм в колі $r - C$ при заряді конденсатора

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

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

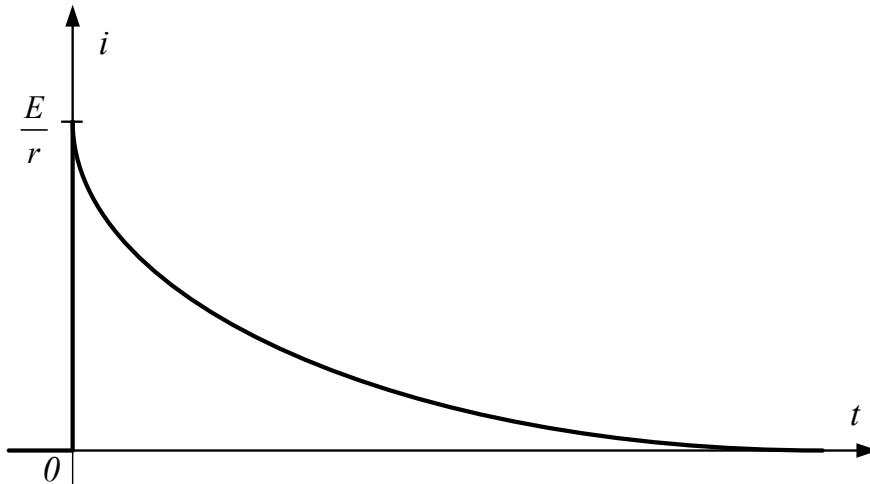


Рисунок 16.3

Розглянемо перехідний процес при розряджанні через опір r , попередньо зарядженого до напруги E конденсатора (рис.16.4).

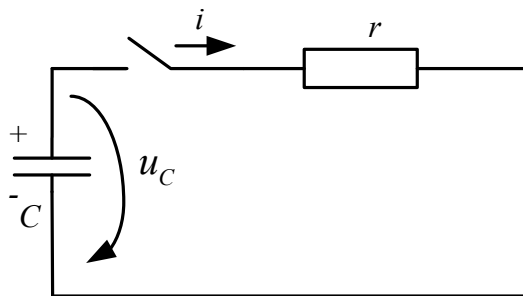


Рисунок 16.4

В такому разі у рівнянні 16.4 права частина дорівнює нулю, тому $u_{Cnp} = 0$ і розв'язок матиме вигляд:

$$u_c = E e^{-t/\tau} \quad (16.12)$$

Графік зміни u_c для цього випадку показаний на рис. 16.5. Струм змінюється так само, як і в випадку заряджання ємності.

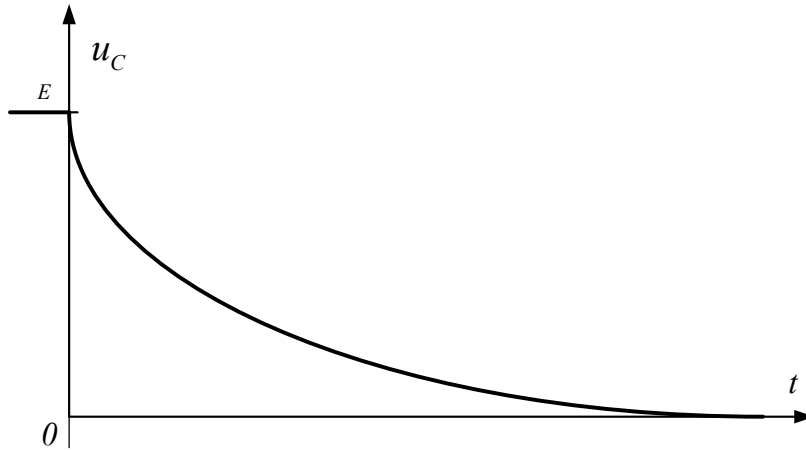


Рисунок 16.5

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

Перехідний процес в колі $r - L - C$

Згідно з другим законом Кірхгофа рівняння для кола буде

$$ir + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt + u_C(0) = E. \quad (16.13)$$

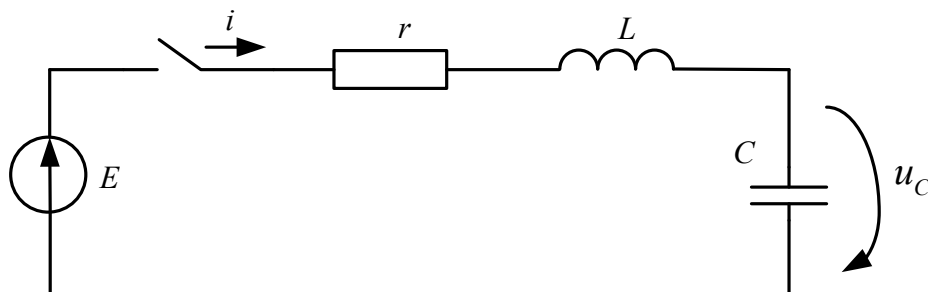


Рисунок 16.6

Після диференціювання отримаємо рівняння другого порядку:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0. \quad (16.14)$$

Характеристичне рівняння

$$p^2 + \frac{r}{L} p + \frac{1}{LC} = 0 \quad (16.15)$$

має корені

$$p_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (16.16)$$

Залежно від співвідношення складових під коренем будемо мати три види коренів

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

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

$$i = i_g = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (16.17)$$

Графіки струму i , напруги на ємності u_c та індуктивності u_L показано на рис. 16.7.

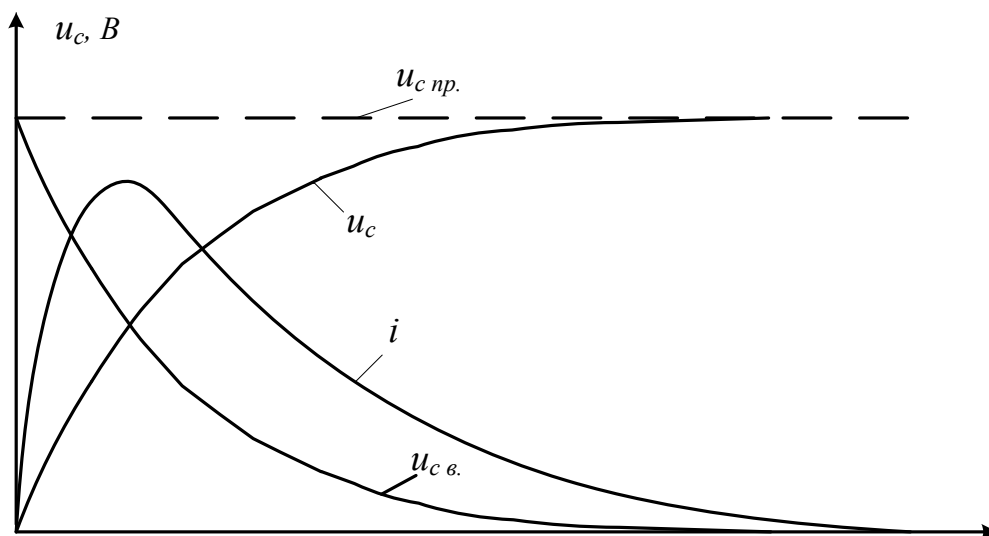


Рисунок 16.7

В другому випадку корені характеристичного рівняння:

$$p_1 = -\delta + j\omega; \quad p_2 = -\delta - j\omega, \quad (16.18)$$

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

У такому випадку перехідний процес в колі є періодичним (коливальним). Рівняння струму має вигляд:

$$i = i_g = I_m \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t . \quad (16.19)$$

З рівняння та графіків (рис. 16.8.) випливає, що струм i , а також напруги u_c і u_L змінюються за законом затухаючої синусоїди.

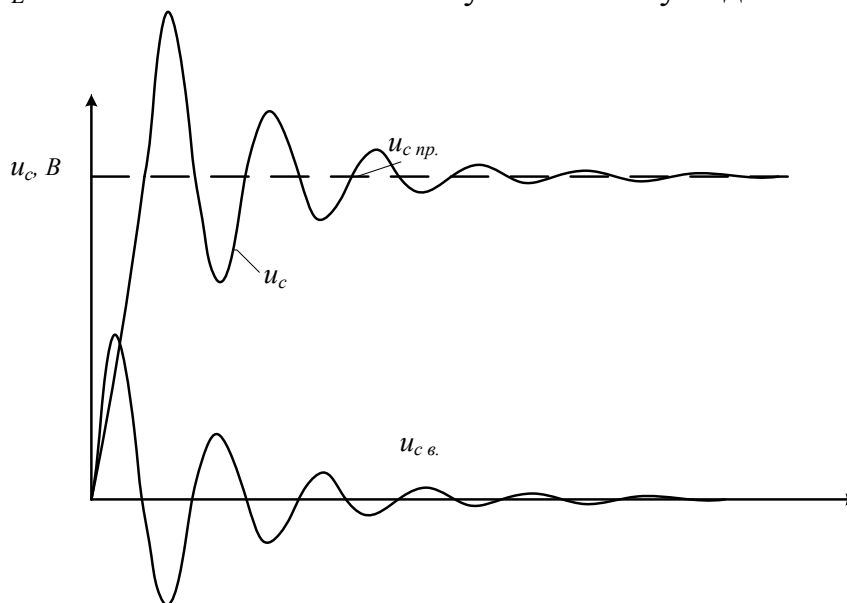


Рисунок 16.8

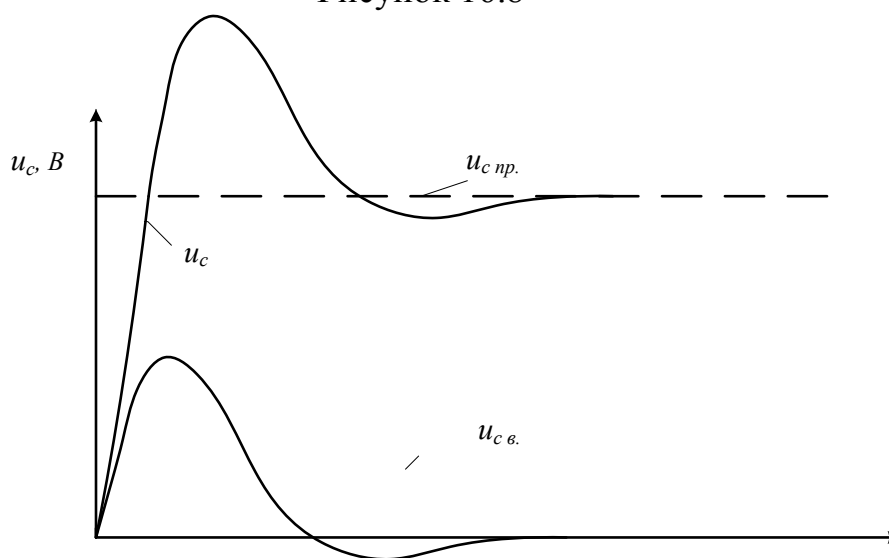


Рисунок 16.9

Якщо корені однакові, тобто $(\frac{r}{2L})^2 = \frac{1}{LC}$, то перехідний процес є критичним (рис. 16.9). Він перехідний між аперіодичним та коливальним процесами. Опір $r_{кр}$ в цьому режимі називається критичним.

В лабораторній роботі для отримання різних за характером перехідних процесів змінюють r , що здійснити найпростіше.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 16А

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ $r - L$ ТА $r - C$

Мета роботи – дослідити характер перехідних процесів в колах $r - L$ та $r - C$, встановити залежність перехідних процесів від параметрів кола.

Підготовка до роботи

1. Що називається перехідним процесом?
2. Які причини виникнення перехідних процесів в колах?
3. Сформулювати закони комутації.
4. Що називають незалежними початковими умовами? Залежними?
5. Як стала часу кола характеризує перехідний процес?
6. Для того, щоб мати можливість спостерігати перехідний процес за допомогою осцилографа, перехідний процес має періодично повторюватись. Здійснити це можна різними способами. В цій лабораторній роботі періодичне повторення перехідного процесу здійснюється за допомогою керованого транзисторного ключа, який інакше називають генератором прямокутних імпульсів (ГПІ).

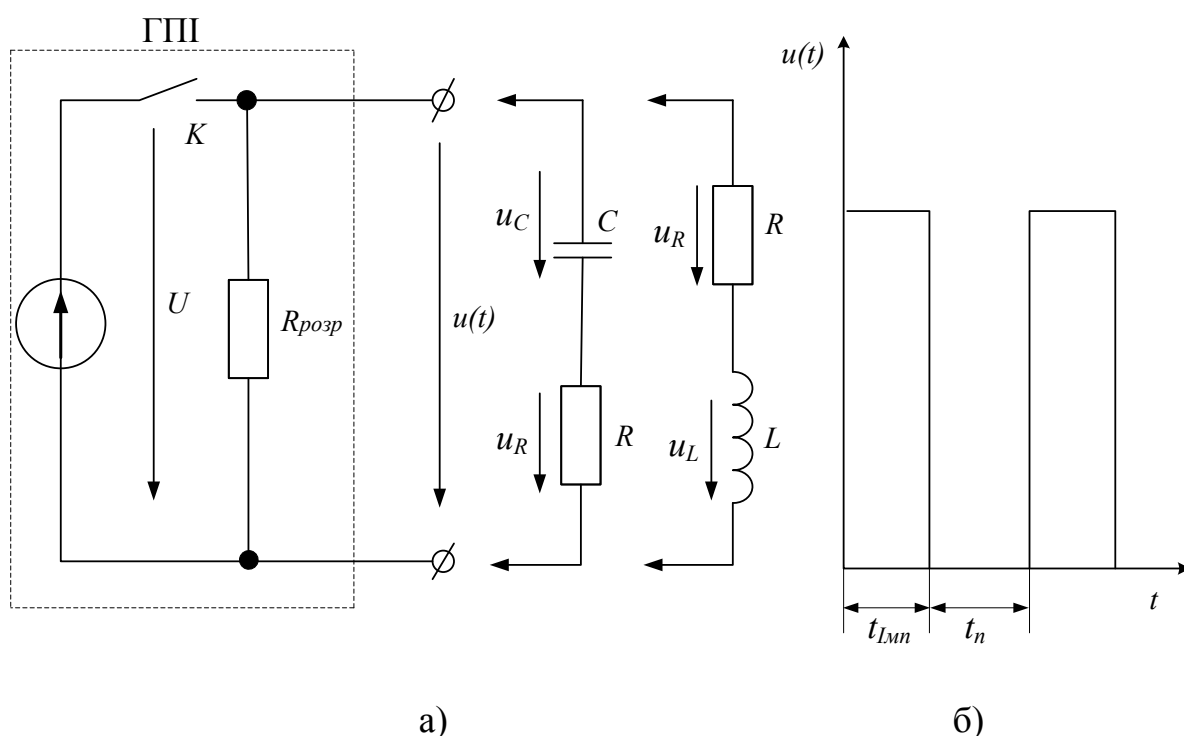


Рисунок 16А.1

Принцип дії ГПІ пояснюється на рис. 16А.1, а), ключ «К» в ГПІ періодично замикається. В момент замикання ключа «К» на вихідних

клеммах m-n генератора з'являється напруга $u = U$. Це відповідає моменту ($t=0$) на рис. 16-А.1, б). Ця напруга не змінюється доти, доки ключ «К» замкнений, що відповідає проміжку часу t_i на рис. 16-А.1, б). Якщо до клем приєднати коло $r - C$, то протягом цього часу конденсатор C буде заряджатись через опір r . Після розмикання ключа «К» джерело напруги ГПШ від'єднується від клем m-n. В цьому стані джерело знаходиться протягом часу t_n (рис. 16-А.1, б); в цей час конденсатор C розряджається через опір $(r + r_{розр})$. Потім ключ знову замикається і процес повторюється.

Якщо приєднати до конденсатора осцилограф, то можна спостерігати зміну напруги u_C в часі.

Якщо приєднати осцилограф до опору r , то на екрані побачимо графік залежності напруги u_r , пропорційної (!) струму i

$$u_r \sim i_r.$$

Якщо приєднати до клем m-n коло $r-L$, то можна спостерігати перехідний процес в цьому колі.

В лабораторній роботі перехідні процеси в колах $r-C$ та $r-L$ досліджуються при трьох значеннях опорів r : r_1, r_2, r_3 .

7. В таблиці 16-А.1 наведено значення r ($r_{1,2,3}$), L , C для кожної бригади. Також наведено значення напруги U на виході ГПШ і частоту (*frequency*) перемикавання ключа.

$$r_{розр} = 510 \text{ Ом для всіх бригад.}$$

Таблиця 16А.1

Номер бригади	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r_1 , кОм	0,43	0,3	0,56	0,2	0,43	0,24	0,16	0,47	0,36	0,3
r_2 , кОм	2,4	2,49	2,2	2,19	2,49	2,49	2,49	2,49	2,2	2,4
r_3 , кОм	3,3	4,7	3,9	5,6	2,7	8,2	5,1	5,1	5,6	7,5
L , мГн	32	30	23	24	26	22	29	34	24	25
C , нФ	15	15	15	15	15	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
f , Гц	800	820	814	900	890	840	840	950	920	850
U , В	7,05	7,15	6,65	6,6	7,2	7,2	6,65	7,05	6,45	6,9

8. За даною частотою визначити період перемикання.

Визначити інтервали t_i і t_n (вважаємо, що $t_i = t_n$).

9. Розрахувати і побудувати на одному графіку залежності напруги u_C і струму i в перехідному процесі від часу в колі $r-C$ за даними для вашої бригади параметрами r_1 і C . Вирази для u_C та i отримати як для заряджання, так і для розряджання конденсатора. Графіки будувати в проміжку часу t_i та t_n на міліметрівці.

10. Визначити значення u_C в моменти t_1 і t_2 , які зображені на рис. 16А.1, б) (на кінцях проміжків t_i і t_n) при опорах в колі r_1, r_2, r_3 .

11. Розрахувати і побудувати на одному графіку залежність напруги u_L і струму i в перехідному процесі в колі $r-L$ за заданими для бригади параметрами r_1 і L . Розрахунок і побудову графіків зробити для проміжків часу t_i та t_n .

12. Розібратися зі схемою лабораторного макета, зображеного на рис. 16А.2.

S_1 – ключ, що під'єднує макет до джерела живлення.

Ємність C , індуктивність L та опори r_1, r_2, r_3 з'єднані послідовно і під'єднані до клем m-n ГПШ. При замиканні ключа S_2 вправо осцилограф, приєднаний до відповідних клем на макеті, вмикається на один з опорів r_1, r_2, r_3 . Напруга на опорі пропорційна струму в колі, тому крива струму як функція часу має такий самий вигляд, як і крива напруги. За відомим масштабом напруги і значенням опору можна визначити масштаб струму.

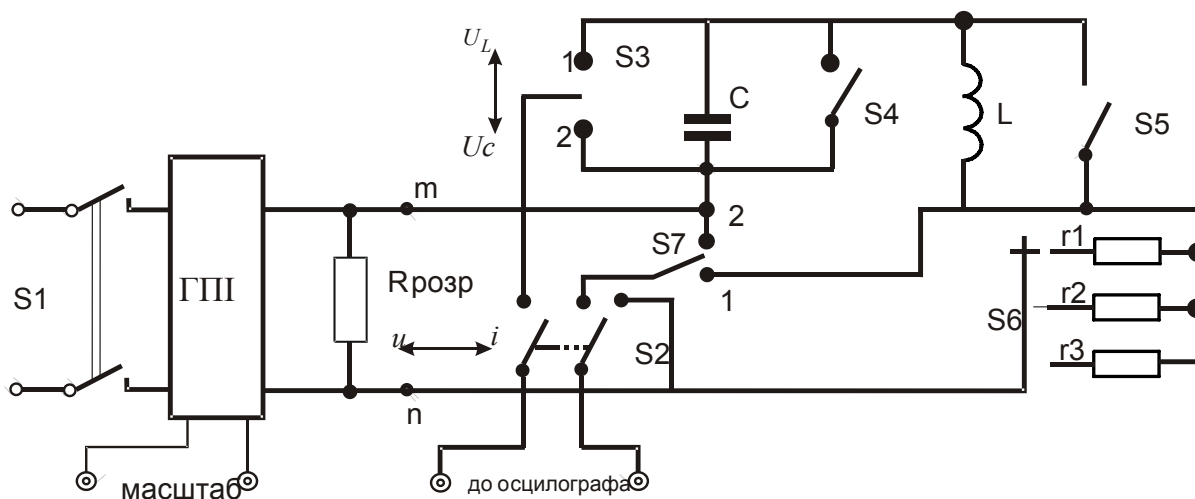


Рисунок 16А.2

Ключами S_4 і S_5 можна закоротити відповідно ємність та індуктивність.

При вмиканні ключа S_2 вліво осцилограф приєднується до індуктивності, якщо S_3 буде в верхньому положенні, а S_5 – розімкнений; або до ємності, якщо S_2 ввімкнений вправо, а S_3 в нижньому положенні, а S_5 – замкнений і S_4 – розімкнений). Ключом S_6 можна встановити в колі різні значення опору r_1, r_2, r_3 .

Для визначення масштабів напруги і часу на екрані осцилографа використовуються клеми ГПІ «Масштаб». На рис. 16-А.1, б) наведено графік напруги на виході ГПІ. Амплітудне значення (*peak value*) та частоту цієї напруги вказано на лицьовій панелі лабораторного макета і в таблиці. Схему нарисувати в «заготовці» звіту.

13. Для зняття осцилограм взяти з собою на лабораторне заняття кальку розміром стандартного листа паперу. Бажано мати на занятті інструмент, що дасть змогу розрізати кальку на частини відповідно до розміру екрана осцилографа.

Завдання до лабораторної роботи і методичні вказівки

1. Дослідити перехідний процес в колі $r - C$.

1.1. Після дозволу викладача ввімкнути осцилограф.

1.2. Підготувати 6 аркушів з кальки розміром, відповідним екрану осцилографа.

1.3. Приєднати вхід осцилографа до клем «До осцилографа» лабораторного макета.

Набрати на макеті коло $r - C$.

Ввімкнути живлення ГПІ. Подати на вхід осцилографа напругу u_c . Ручками «Підсилення», «Розгортка», «Рівень синхронізації», «Переміщення променя по горизонталі», «Переміщення по вертикалі» встановити на екрані зручне для спостереження стійке зображення досліджуваної величини.

Незмінюючи положення ручок осцилографа «Підсилення» та «Розгортка», зняти осцилограми $u_c(t)$ при трьох значеннях опору (r_1, r_2, r_3) на кальку.

Масштаби напруги та часу записати відповідно до позначень на ручках осцилографа «Підсилення» та «Розгортка».

1.4. Переключити перемикач S_2 в положення I – при цьому на осцилограф буде подаватись напруга від одного із трьох резисторів r_1, r_2, r_3 .

Ручкою «Підсилення» встановити на екрані зручний розмір зображення з максимальною амплітудою трьох напруг u_{r1}, u_{r2}, u_{r3} . Осцилограми цих напруг зняти на кальку.

2. Дослідити перехідний процес в колі $r - L$.

Все виконується аналогічно п. 1 завдання до роботи.

3. Порівняти розрахункові та експериментальні криві досліджених процесів.

4. Зробити висновки.

Контрольні запитання

(Див. контрольні запитання до Лабораторної роботи №16АВВ)

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16АВВ

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ

Мета роботи: дослідити перехідні процеси в *лінійних колах (linear circuit)* першого порядку.

Порядок виконання роботи

1. Скласти на набірному полі схему (рис. 16АВВ.1). Значення параметрів взяти згідно з таблицею варіантів (табл. 16АВВ.1). Номер варіанта задає викладач. Параметри функціонального генератора наведено на рис. 16АВВ.2.

Таблиця 16АВВ.1

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

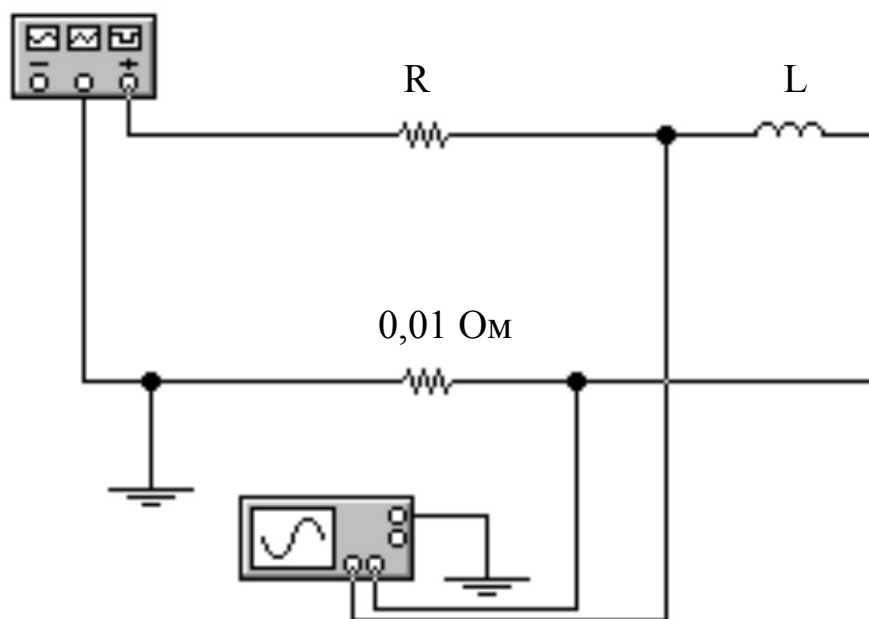


Рисунок 16АВВ.1

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

3. Роздрукувати електричну схему, параметри та осцилограми.

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

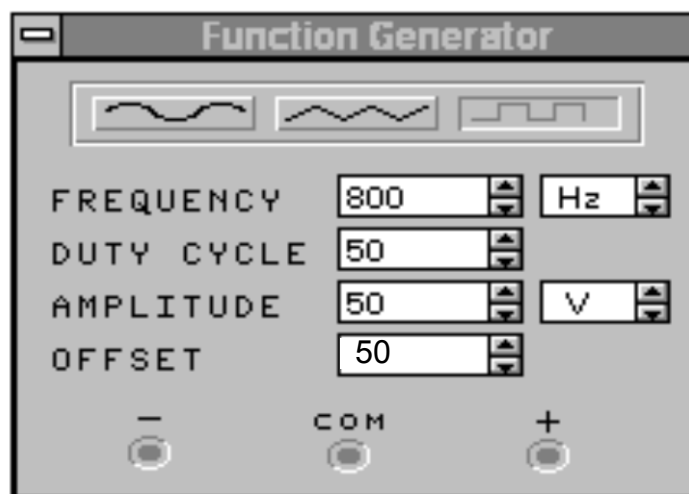


Рисунок 16AWB.2

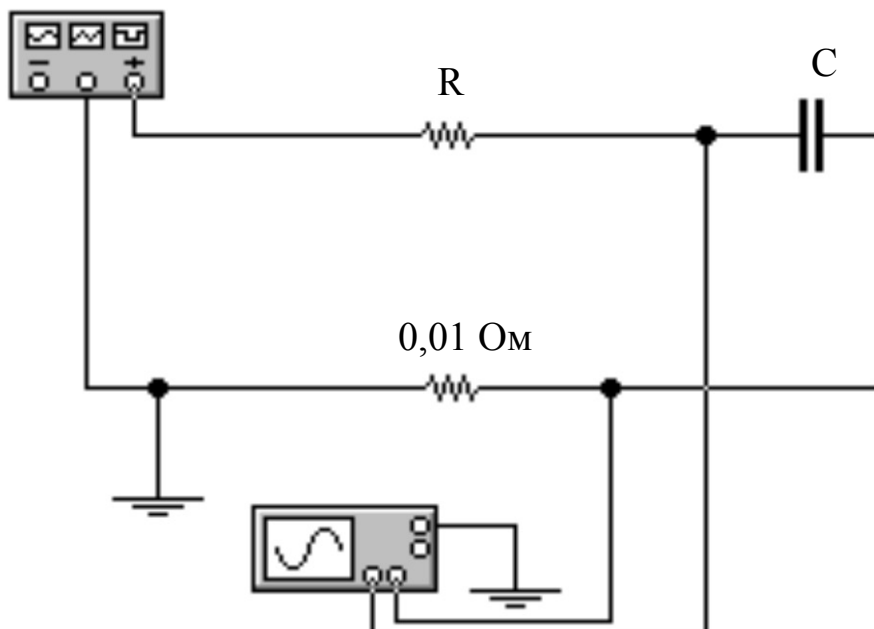


Рисунок 16AWB.3

Таблиця 16АWB.2

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

5. За допомогою двопробеневого осцилографа зняти криві напруги та струму на ємності.

6. Роздрукувати електричну схему, параметри та осцилограми.

Обробка результатів дослідів

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

Контрольні запитання

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

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №16Б

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ПОСЛІДОВНОМУ КОЛІ $r-L-C$

Мета роботи: дослідити характер перехідних процесів в колі $r-L-C$, встановити їх залежність від параметрів кола.

Підготовка до роботи

1. Які бувають перехідні процеси в послідовному колі $r-L-C$? Як залежить вид перехідного процесу від параметрів кола?
2. Як набрати за допомогою перемикачів на лабораторному макеті коло $r-L-C$. (Пояснити по схемі макета в звіті до лабораторної роботи № 16А)
3. Як зняти осцилограми $u_C(t)$, $u_L(t)$, $i(t)$? (Пояснити по схемі макета).
4. Як визначити масштаби при знятті осцилограм?
5. В заготовці звіту нарисувати схему кола $r-L-C$; приєднаного до ГП.
6. Розрахувати напругу $u_C(t)$ в колі $r-L-C$ при трьох значеннях опору r в колі: r_1, r_2, r_3 . Опір r_2 підібраний таким, що дорівнює критичному. При розрахунку звернути на це увагу і перевірити відповідність його $r_{кр}$.
7. Побудувати на міліметровці в масштабі графіки розрахованих перехідних процесів.
8. Підготувати кальку для зняття 6 осцилограм.

Завдання до лабораторної роботи та методичні вказівки

1. Дослідити перехідні процеси в послідовному колі $r-L-C$ при трьох значеннях резистора r (r_1, r_2, r_3).
 - 1.1. Встановити в колі $r-L-C$ на макеті спочатку опір r_1 . Встановити на екрані осцилографа стійке зображення $u_C(t)$, зняти його осцилограму.
 - 1.2. Зняти осцилограми $u_C(t)$ та $i(t)$ при $r = r_1, r_2, r_3$.

Увага! Якщо виникає необхідність зміни положень ручок «Підсилення» і «Розгортка» для отримання зручного зображення на екрані осцилографа, то щоразу масштаби напруги та часу записуються у звіт.
 - 1.3. Порівняти побудовані за результатами розрахунку і зняті експериментально графіки досліджуваних процесів.
 - 1.4. Зробити висновки.

Контрольні запитання

(Див. контрольні запитання до Лабораторної роботи №16АВВ)

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16БWB

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

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

Порядок виконання роботи

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

Таблиця 16БWB.1

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

2. Скласти на набірному полі схему (рис. 16БWB.1). Параметри функціонального генератора наведені на рис. 16БWB.2.

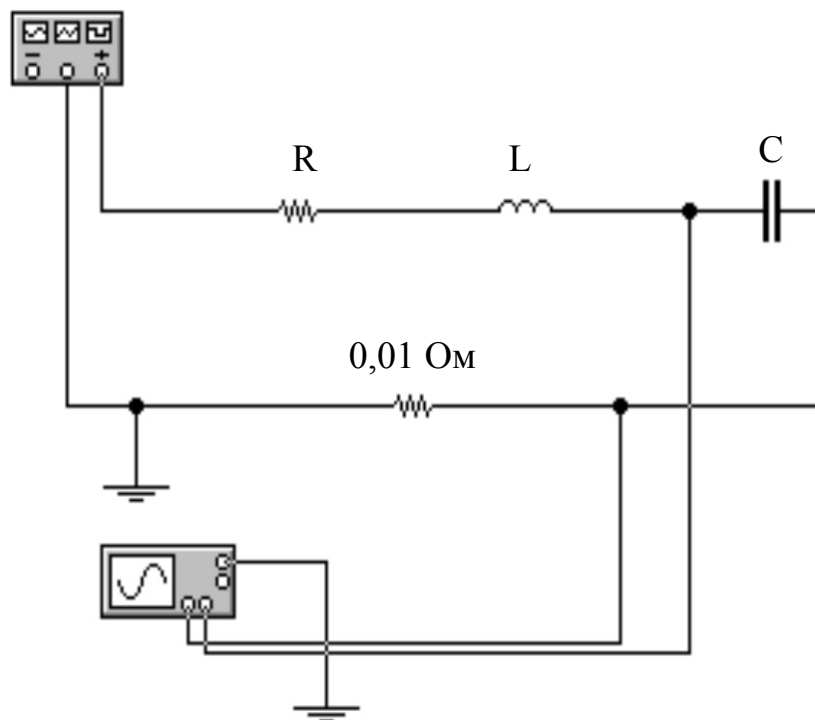


Рисунок 16БWB.1

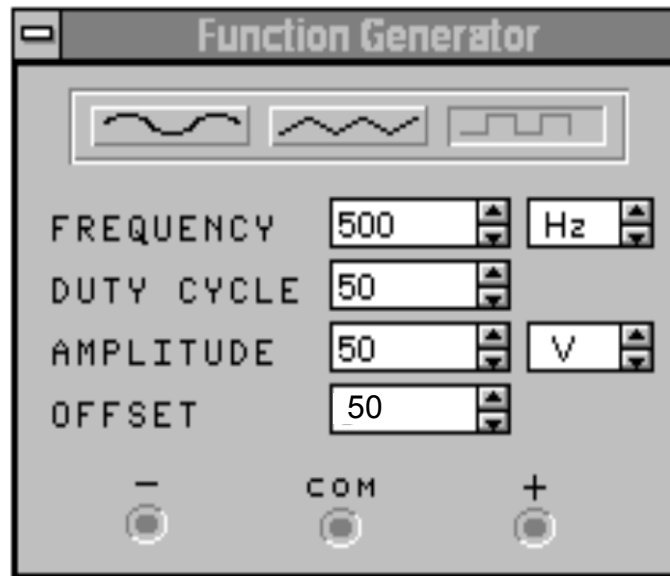


Рисунок 16БWB.2

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

- $R = r_{кр}$
- $R = 2r_{кр}$
- $R = 0.3r_{кр}$

4. Роздрукувати електричну схему, параметри та осцилограми.

Обробка результатів дослідів

1. Розрахувати перехідні напругу на ємності та струм в колі.
2. За результатами розрахунків побудувати графіки та порівняти їх з кривими, отриманими при моделюванні на ЕОМ.
3. Зробити висновки.

Контрольні запитання

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

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16ВВВ

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПРИ ДОВІЛЬНИХ ЗБУДЖЕННЯХ

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

Теоретичні відомості

При розрахунку перехідних процесів при довільних збудженнях широко використовуються *перехідні характеристики (transient response)* і *імпульсні характеристики (pulse response)*. Для одержання поняття про ці характеристики розглянемо спочатку одиничну східчасту функцію $\mathbf{1}(t)$ (рис. 16ВВВ.1). Цю функцію інакше називають *функцією Хевісайда (heaviside function)*.

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

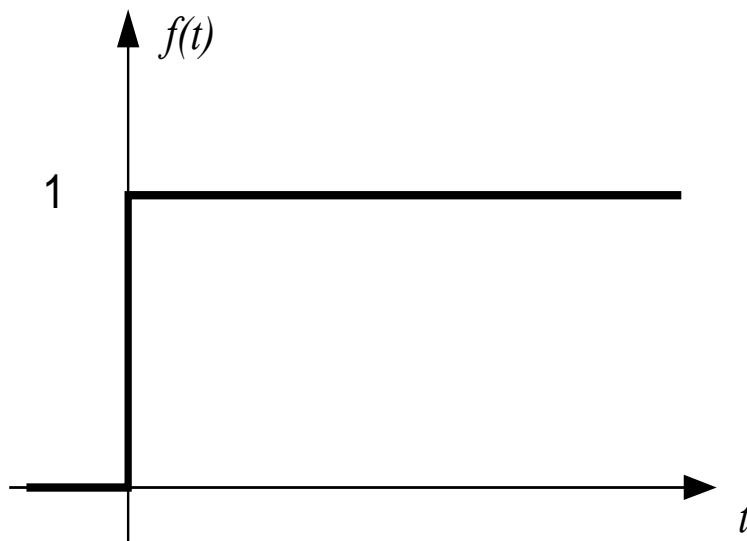


Рисунок 16ВВВ.1

За допомогою цієї функції може бути описано вмикання джерела довільної ЕРС в момент $t = 0$

$$e_{em}(t) = \mathbf{1}(t)e(t). \quad (16ВВВ.2)$$

Якщо одинична східчаста функція діє не в момент $t = 0$, а зміщена на час τ (рис. 16ВВВ.2), то вона записується як

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

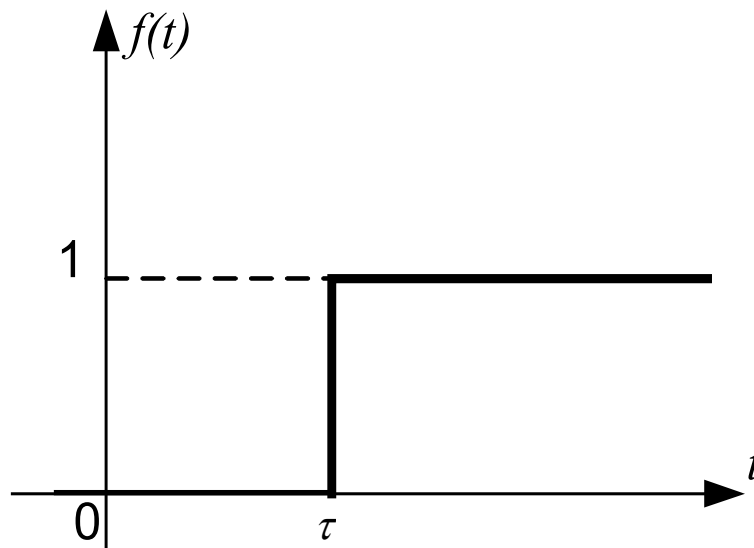


Рисунок 16BWB.2

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

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

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

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

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

$$X(s) = K(s) \cdot F(s), \quad (16\text{BWB.5})$$

де $K(s)$ – *передавальна функція (transfer function)* кола.

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

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

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

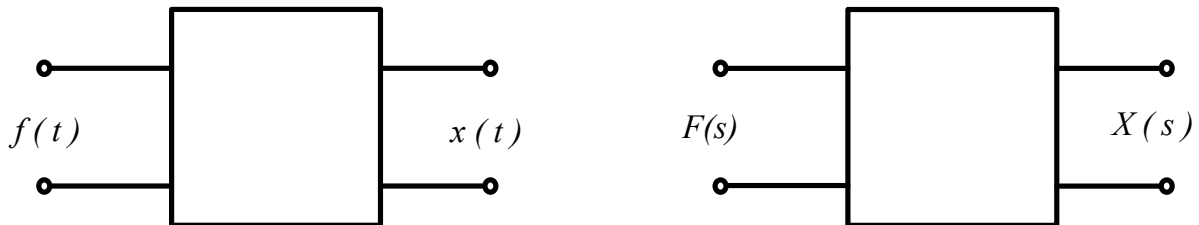


Рисунок 16BWB.3

Приклад 1

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

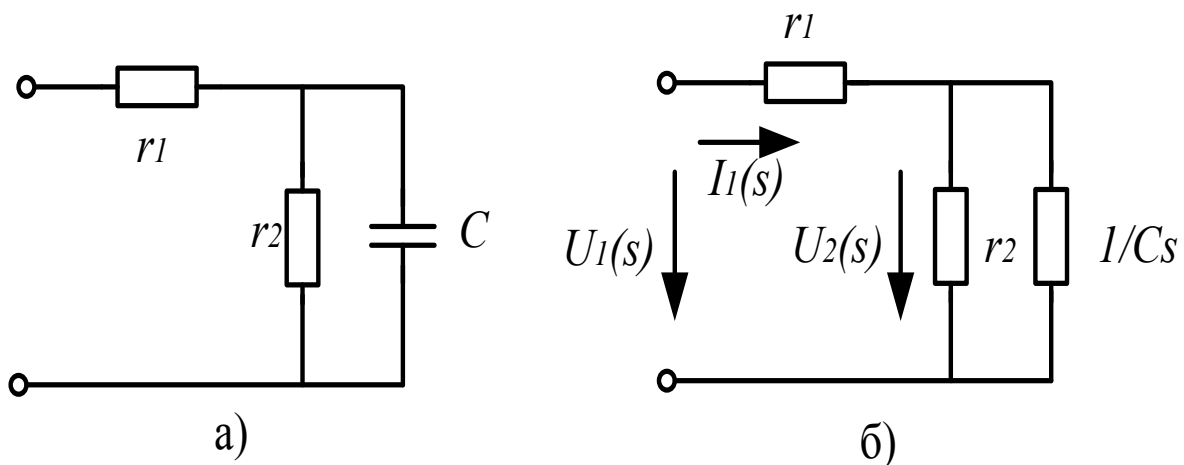


Рисунок 16BWB.4

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

Знаходимо спочатку вхідний струм

$$I_1(s) = \frac{U_1(s)}{r_1 + \frac{1}{r_2 + \frac{1}{sC}}} = \frac{U_1(s)(r_2Cs + 1)}{r_1r_2Cs + r_1 + r_2}.$$

Шукана напруга

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

Передавальна функція кола

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

Зображення перехідної характеристики відповідно до (16BWB.6)

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

Використовуючи теорему розкладання, знаходимо оригінал перехідної характеристики

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

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

$$x(t) = U_0 h(t) + \int_0^t u'(\tau) h(t-\tau) d\tau, \quad (16BWB.9)$$

де $u(t)$ – напруга на вході кола, U_0 – значення цієї напруги при $t = 0$, $h(t)$ – перехідна характеристика кола, $u'(\tau)$ – значення похідної від вхідної напруги, в якій змінна t замінена на змінну τ , $h(t-\tau)$ – перехідна характеристика кола, в якій змінна t замінена на змінну $t-\tau$.

Цей вираз називають інтегралом накладання або інтегралом Дюамеля (*Duhamel integral*).

Приклад 2

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

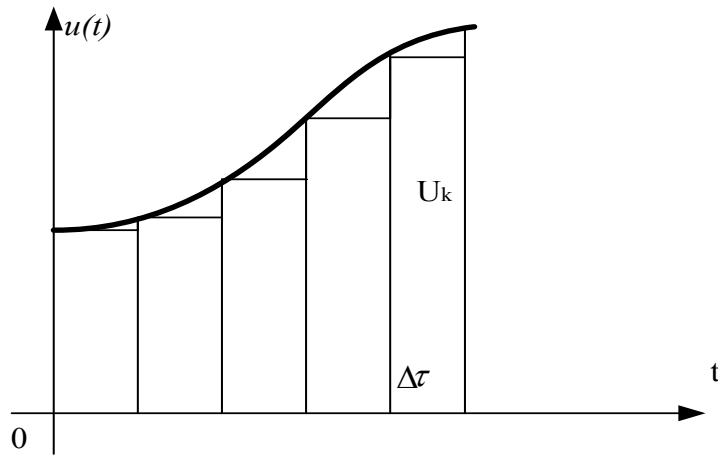


Рисунок 16ВВВ.5

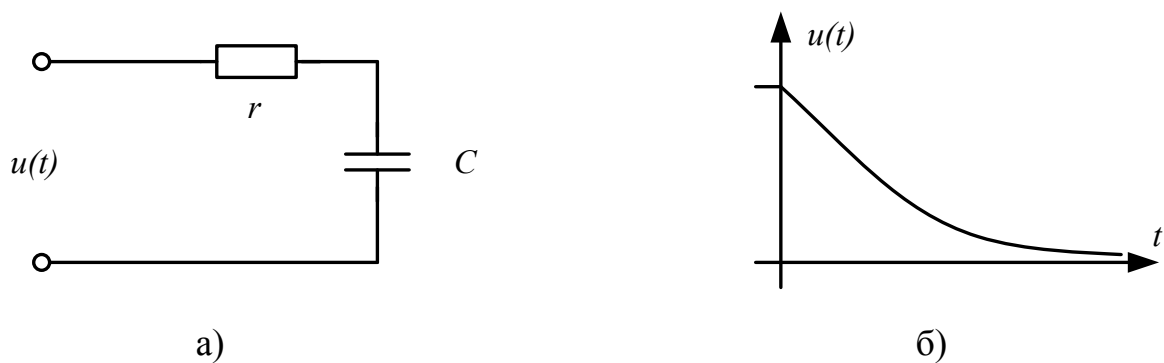


Рисунок 16ВВВ.6

Перехідна характеристика для напруги на ємності, де $h(t) = 1 - e^{-\alpha t}$.
Визначаємо всі величини, які входять в інтеграл Дюамеля:

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

В результаті одержуємо:

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

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

Порядок виконання роботи

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

Таблиця 16ВВВ.1

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

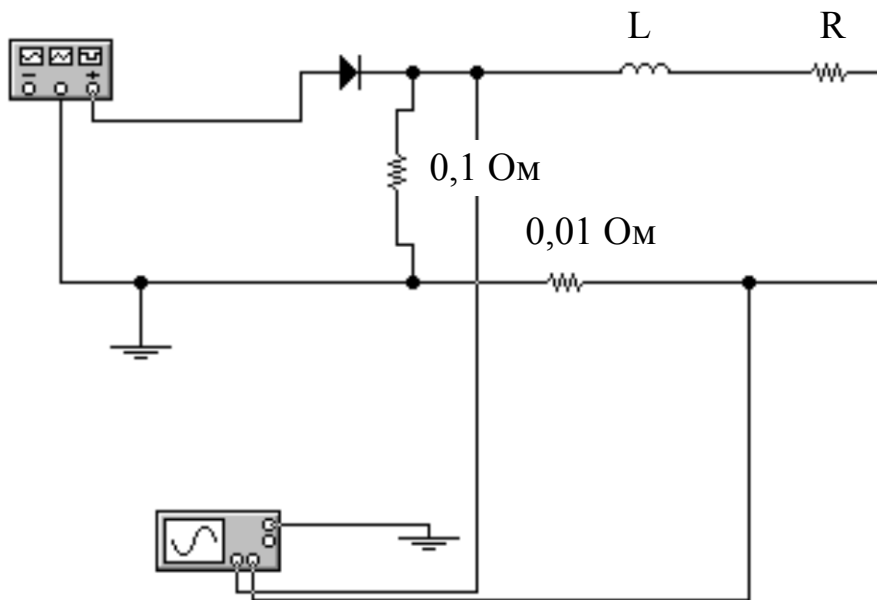


Рисунок 16ВВВ.7

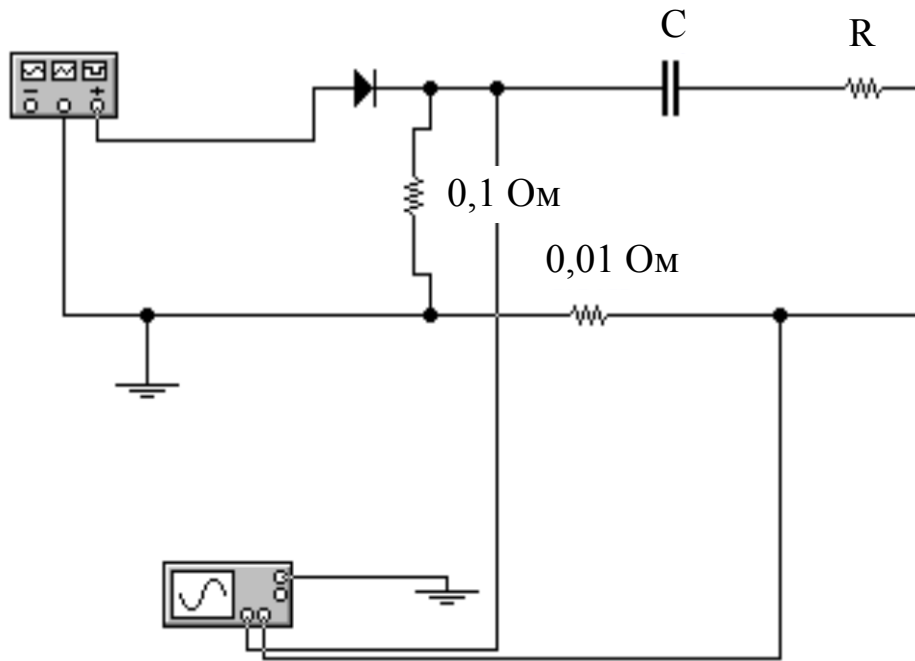


Рисунок 16BWB.8

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

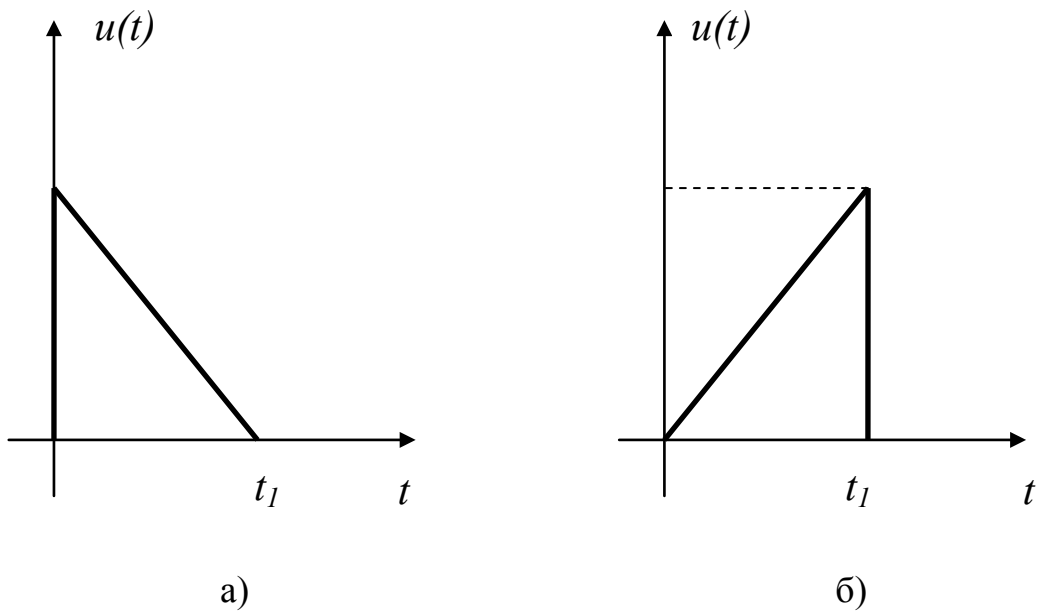
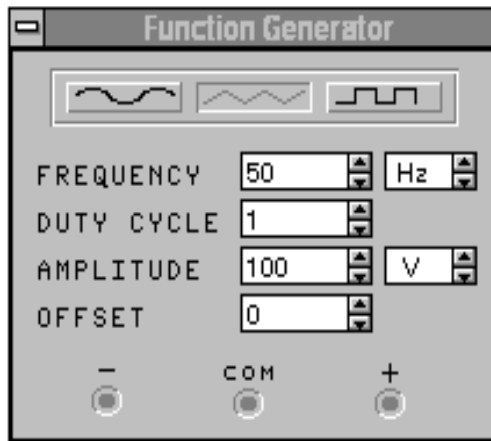
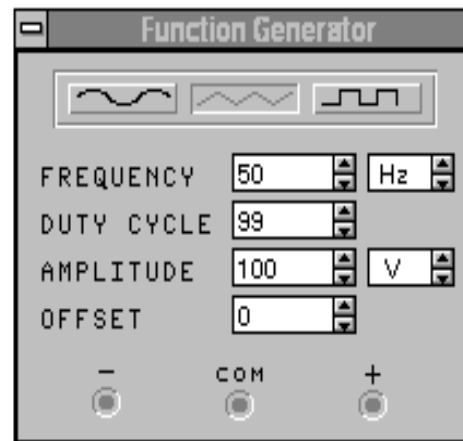


Рисунок 16BWB.9



а)



б)

Рисунок 16BWB.10

3. За допомогою двопроменевого осцилографа зняти криві вхідної напруги та реакції кола.

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

Обробка результатів дослідів

1. Розрахувати перехідну характеристику для заданого електричного кола.

2. Записати аналітичний вираз вхідного сигналу.

3. За допомогою інтеграла Дюамеля провести аналітичний розрахунок реакції кола (вихідного сигналу).

4. За результатами розрахунків побудувати графіки вхідного та вихідного сигналів та порівняти їх з кривими, отриманими при моделюванні на ЕОМ.

5. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Що називається одиничною східчастою функцією?

2. Як знаходиться перехідна характеристика кола?

3. Як знаходиться імпульсна характеристика кола?

4. Мета даної лабораторної роботи.

5. Як розрахувати перехідний процес для довільного вхідного сигналу за ненульових початкових умов?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 17

НЕЛІНІЙНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити кола, в яких послідовно, паралельно і змішано з'єднані елементи з нелінійними *вольт-амперними характеристиками (voltage-current curve)*.

Теоретичні відомості

Нелінійним електричним (non-linear circuit) колом вважається коло, яке має хоча б один *нелінійний елемент (non-linear element) (НЕ)*, тобто такий елемент, струм та напруга на якому пов'язані нелінійно. Залежність між напругою та струмом НЕ називається *вольт-амперною характеристикою (ВАХ)*.

Суттєва особливість нелінійних електричних кіл – неможливість застосування методу накладання. Процеси в нелінійних електричних колах описуються нелінійними алгебраїчними або диференціальними рівняннями.

При розрахунку нелінійних кіл вводять поняття *статичного та диференціального опорів (incremental resistance) НЕ*. На рис. 17.1 подано ВАХ НЕ в масштабі струму m_i і напруги m_u . Точка «а» є робочою точкою.

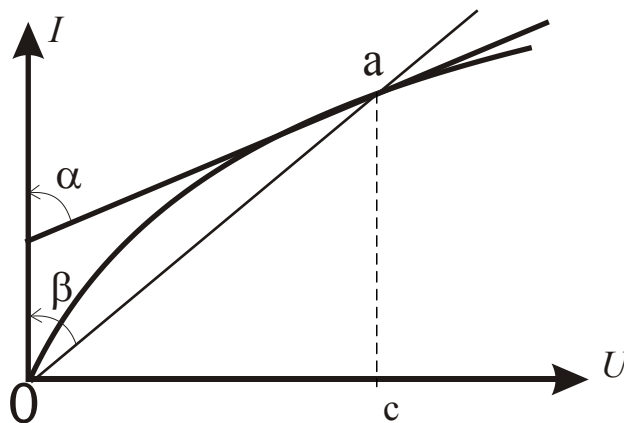


Рисунок 17.1

Відношення напруги, якій відповідає відрізок Ос, до струму (відрізок са), визначає в масштабі $m_R = m_U / m_I$ величину, яка називається *статичним опором* в даній точці. З рис. 17.1 видно, що значення цього опору пропорційне тангенсу кута β між прямою, що з'єднує точку «а» з початком координат і віссю струмів, тобто

$$r = \frac{U}{I} = \frac{m_U OC}{m_I Ca} = m_r \operatorname{tg} \beta.$$

Відношення приросту напруги до приросту струму або похідна від напруги за струмом в тому ж масштабі m_r визначає диференціальний опір r_g . Значення цього опору пропорційне тангенсу кута α між дотичною до ВАХ в точці «а» і віссю струмів, тобто

$$r_g = \frac{dU}{dI} = m_r \operatorname{tg} \alpha.$$

Для прямолінійної ділянки ВАХ диференціальний опір можна визначити відношенням кінцевого приросту напруги до кінцевого приросту струму, тобто

$$r_g = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Для НЕ зі спадною ВАХ значення диференціального опору від'ємне, тому що додатний приріст струму супроводжується від'ємним приростом напруги.

Нелінійні електричні кола простої конфігурації зручно розраховувати графоаналітичним методом. Розрахунок нелінійного кола зводиться до знаходження струмів та напруг на ділянках кола за допомогою ВАХ.

При послідовному з'єднанні НЕ загальна ВАХ усього кола (рис. 17.2) може бути отримана додаванням абсцис ВАХ окремих елементів для одних і тих самих значень струму. При паралельному з'єднанні (*parallel connection*) НЕ загальна ВАХ усього кола (рис. 17.3) може бути отримана додаванням ординат ВАХ окремих елементів при одних і тих самих значеннях напруги.

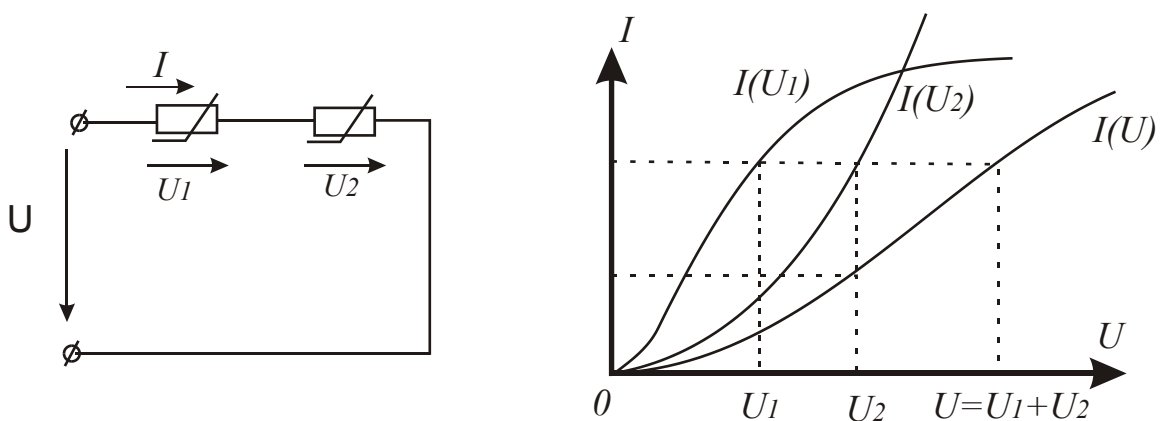


Рисунок 17.2

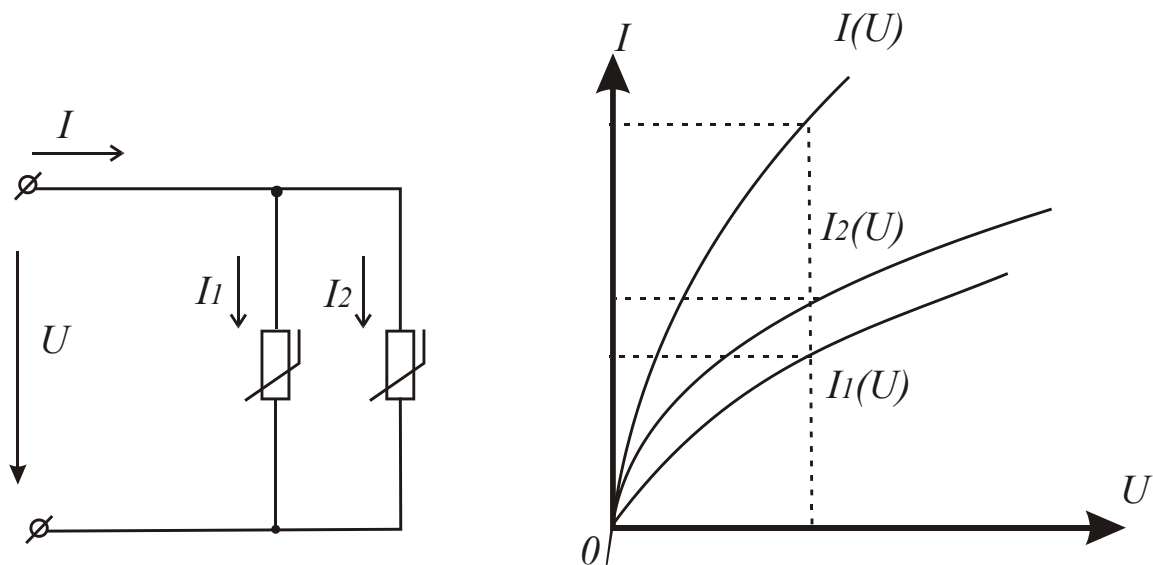


Рисунок 17.3

На рисунку 17.4 зображено схему випадку змішаного з'єднання НЕ, а на рисунку 17.5 подано побудову сумарної вольт-амперної характеристики такого кола за вольт-амперними характеристиками окремих елементів.

Після заміни двох паралельно з'єднаних елементів одним еквівалентним схема із змішаним з'єднанням зводиться до розглянутої схеми послідовного з'єднання двох НЕ.

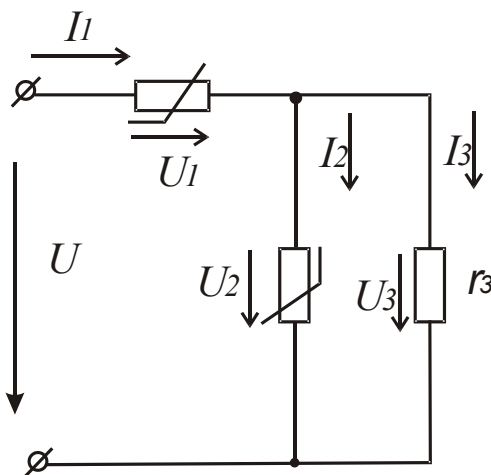


Рисунок 17.4

Відповідним підбором НЕ можна скласти коло, в якому напруга на одній із ділянок буде змінюватися значно менше, ніж напруга на вході кола (стабілізатор напруги) або струм в одній із віток буде мало залежати від зміни опору цієї ж *вітки (branch)* (стабілізатор струму).

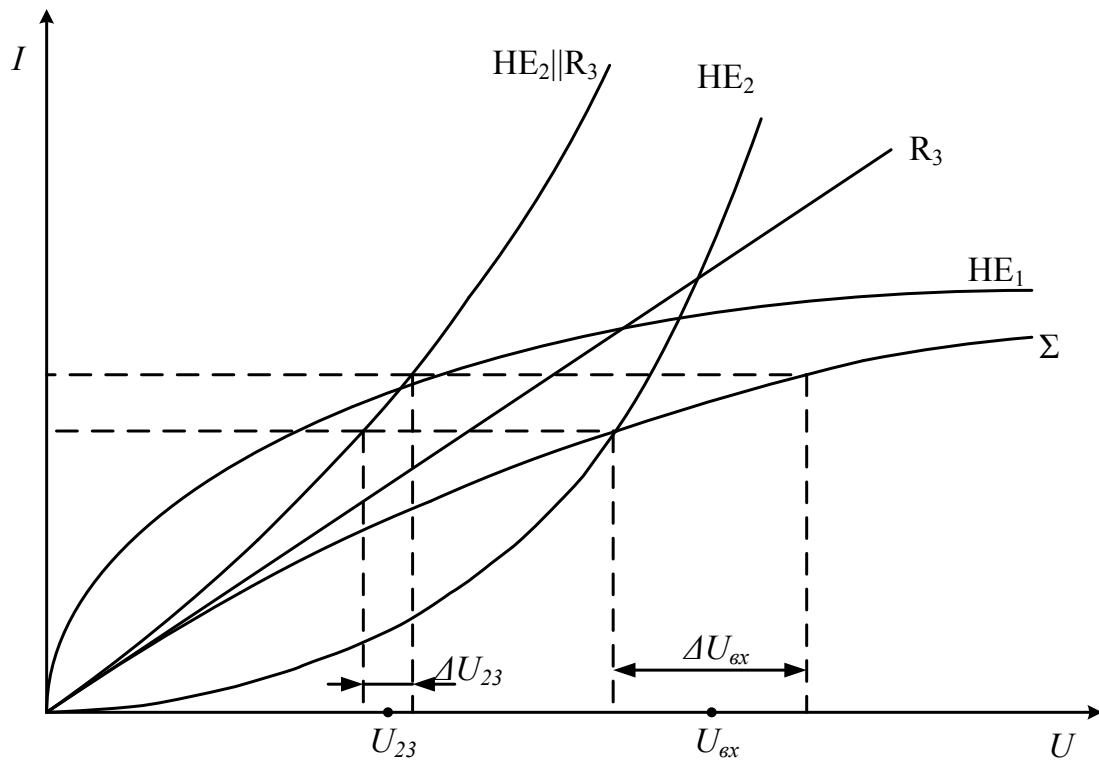


Рисунок 17.5

Схема на рис. 17.4 з поданими на рисунку 17.5 вольт-амперними характеристиками елементів може застосовуватись для стабілізації напруги $U_2 = U_3 - U_{23}$ на опорі приймача r_3 .

Дійсно, якщо напруга U , починаючи з деякого значення, змінюється в широких межах, наприклад на ΔU , напруга U_{23} на опорі r_3 змінюється менше.

Ступінь незмінності напруги на опорі навантаження характеризує коефіцієнт стабілізації (*stabilization factor*).

Коефіцієнт стабілізації напруги – це відношення відносної зміни стабілізованої напруги $\Delta U / U$ до викликаної ним відносної зміни стабілізованої напруги $\Delta U_{23} / U_{23}$, тобто

$$K_{cm} = \frac{\Delta U}{U} \div \frac{\Delta U_{23}}{U_{23}} = \frac{U_{23}}{U} \frac{\Delta U}{\Delta U_{23}}.$$

Очевидно, що чим більший коефіцієнт стабілізації, тим менша відносна зміна стабілізованої напруги.

Порядок виконання роботи

1. Зняти вольт-амперні характеристики:
 - а) лінійного опору;

- б) баретера;
- в) стабілітрона (діода, ввімкнутого в зворотному напрямку).

Для цього використати: джерело постійної напруги на лабораторному стенді; реостат 30 Ом в ролі потенціометра; стабілітрон, баретер та опір R_1 на стенді; вольтметр на 15 В та амперметр на 0,25-1 А.

Результати досліду (10 точок) занести до таблиці 17.1.

Таблиця 17.1

№ № точки	Лінійний опір			Баретер			Стабілітрон		
	U	I	R	U	I	R	U	I	R
	В	А	Ом	В	А	Ом	В	А	Ом
1									
2									
.									
.									
.									
10									

2. Скласти схему стабілізатора напруги (рис. 17.5), для чого баретер B ввімкнути в коло послідовно, а стабілітрон C – паралельно опору.

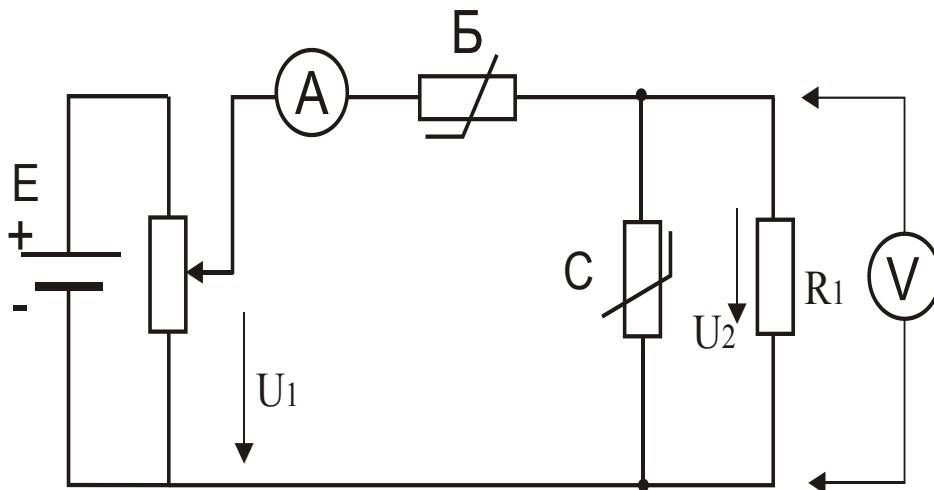


Рисунок 17.5

Результати досліду (10 точок) занести до табл. 17.2.

Таблиця 17.2

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I, A										
U_1, B										
U_2, B										

3. Скласти схему стабілізатора струму згідно з рис. 17.6. Як нелінійний елемент взяти баретер, як навантаження – реостат 30 Ом. Результати вимірювань занести до табл 17.3.

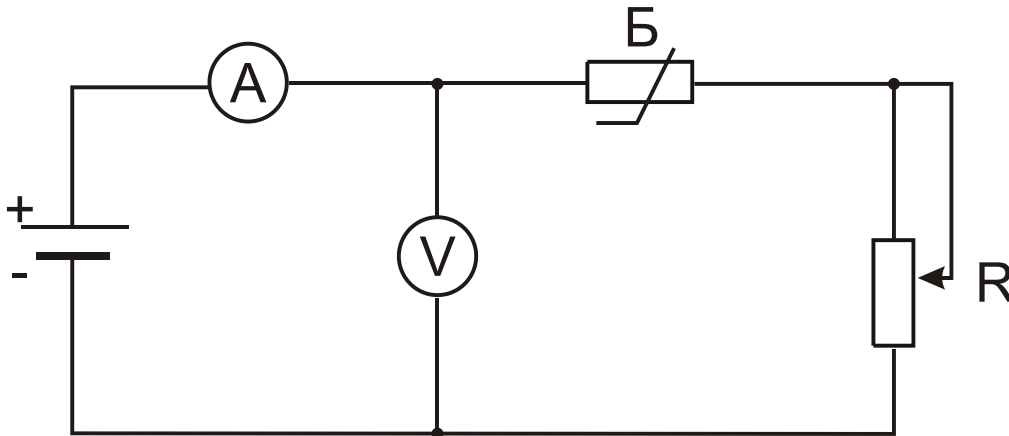


Рисунок 17.6

Таблиця 17.3

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Обробка результатів досліду

1. Побудувати ВАХ трьох елементів за даними досліду п. 1 (на одному графіку).
2. Побудувати вхідну ВАХ кола з трьох НЕ, з'єднаних за схемою рис. 17.6, при цьому використати ВАХ, отримані в п. 1. Потім побудувати на тому ж графіку ВАХ за даними досліду п. 2. Порівняти отримані ВАХ.
3. За даними досліду п. 2. побудувати графіки. Визначити коефіцієнт стабілізації за напругою.
4. За даними досліду п. 3. побудувати залежність струму від опору навантаження.

Контрольні запитання

1. Чи можна застосувати до аналізу та розрахунку процесів в нелінійному колі метод накладення?
2. Як визначити статичний та диференціальний опори НЕ?
3. Як будують сумарні ВАХ при послідовному, паралельному та змішаному з'єднаннях нелінійних елементів?
4. В яких колах застосовують нелінійні елементи?
5. Як визначити коефіцієнт стабілізації за напругою?
6. Зміст експериментальної частини лабораторної роботи. Порядок її виконання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 17А

РОЗГАЛУЖЕНЕ НЕЛІНІЙНЕ КОЛО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідна перевірка результатів аналізу розгалуженого нелінійного кола графічним методом.

Підготовка до роботи

1. Розібратися як будувати результуючу ВАХ елементів, що з'єднані послідовно; паралельно; змішано.
2. Заготовити міліметрівку формату А4.
3. Підготувати «заготовку» звіту з необхідними таблицями та схемами.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему для зняття ВАХ нелінійних елементів методом амперметра та вольтметра. Джерело постійної регульованої напруги взяти з блока нелінійних елементів лабораторного стенда.

2. Зняти ВАХ двох ламп розжарювання (окремо для кожної), що розташовані на блоці нелінійних елементів лабораторного стенда (при знятті ВАХ необхідно, щоб струм та напруга не були більші за номінальний струм та напругу ламп: $U_n=6.3\text{В}$, $I_n=0.3\text{А}$). Результати занести до таблиці.

3. Зняти ВАХ резистора R5, розташованого на стенді та визначити його опір.

4. Скласти схему для зняття ВАХ кола, зображеного на рис.17А.1. Схему з необхідними приладами нарисувати в звіті.

5. Зняти ВАХ кола для схеми рис. 17А.1.

6. Після зняття останньої точки ВАХ в п. 5 зменшити вдвічі напругу на вході кола і зафіксувати відповідне значення вхідного струму.

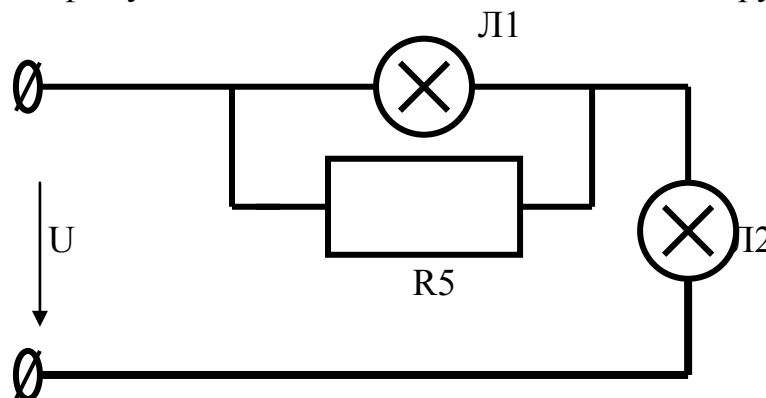


Рисунок 17А.1

Обробка результатів дослідів

1. За результатами дослідів п. 2 та 3 побудувати на міліметровці ВАХ резистора R5 та ламп розжарювання.
2. Використовуючи ВАХ окремих елементів, побудувати результуючу ВАХ кола, зображеного на рис.17А.1. На цей же графік нанести ВАХ цього кола, отриману дослідним шляхом в п. 5.
3. За результатами дослідів п. 6 визначте, у скільки разів зменшився струм на вході кола після зміни напруги вдвічі. Перевірте те саме значення по результуючій ВАХ кола.
4. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Чим нелінійний елемент відрізняється від лінійного?
2. Який вигляд має ВАХ лампи розжарювання?
3. Як побудувати результуючу ВАХ елементів, що з'єднані послідовно; паралельно; змішано?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 17Б

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СТАБІЛІЗАТОР ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Мета роботи: вивчення принципу дії *параметричного стабілізатора (parametric stabilizer)* та визначення деяких характеристик режиму його роботи.

Підготовка до роботи

1. Вивчити за підручником та конспектом принцип дії параметричного стабілізатора напруги на напівпровідниковому стабілітроні (рис. 17Б.1). напруга U_H дуже мало змінюється при зміні U_1 у досить широких межах ($R_H = \text{const}$).

2. Відповісти на запитання: для чого потрібний у схемі стабілізатора опір R_6 .

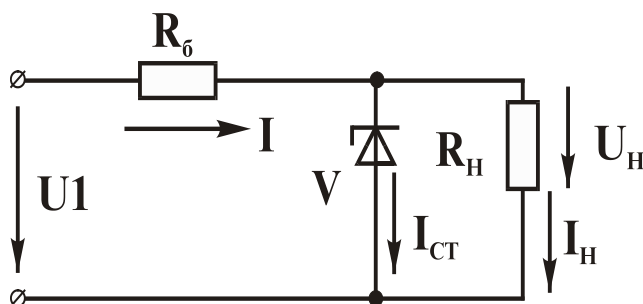


Рисунок 17Б.1

На рис. 17Б.2 показано ВАХ стабілітрона.

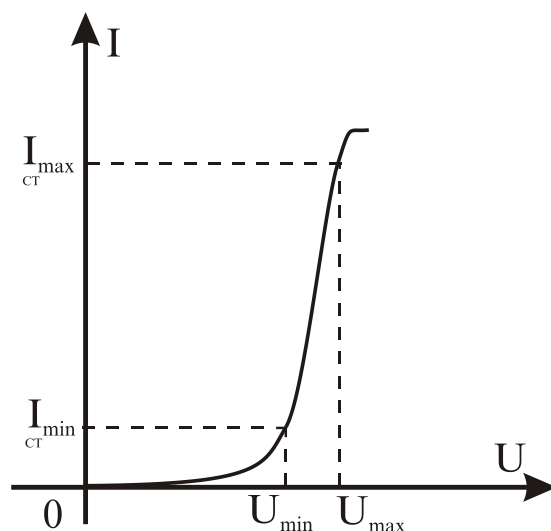


Рисунок 17Б.2

У таблиці 17Б.1 наведено значення опорів R_{δ} та R_H та деякі параметри стабілітрона для кожної бригади студентів.

Таблиця 17Б.1

Номер бригади	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_H , Ом	1000	680	100	560	82	1000	300	150	510	150
R_{δ} , Ом	208	172	244	208	100	244	208	136	208	208
Стабілітрон	Д811	Д809	КС 139А	Д818 Д	КС 133А	КС 175Ж	КС 168А	КС 147А	Д814 А	КС 139А
I_{min} , мА	3	3	3	3	3	0,5	3	3	3	3
I_{max} , мА	23	29	70	33	81	17	45	56	24	70
U_{CT} , В	10...12	8...9,5	3,9	9	3,3	7,5	6,8	4,7	7...8,5	3,9
R_g , Ом	15	10	60	25	65	40	28	56	6	60

У таблиці U_{CT} – напруга стабілізації стабілізатора; R_g – динамічний опір стабілітрона на ділянці стабілізації.

3. Використовуючи дані з таблиці, визначити межі стабілізації напруги стабілізатором та коефіцієнт стабілізації за формулою:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_1}{U_{1CP}} \cdot \frac{\Delta U_H}{U_{HCP}},$$

де ΔU_1 , ΔU_H – зміна вхідної та вихідної напруг, відповідно;

U_{1CP} , U_{HCP} – середнє значення вхідної та вихідної напруг, відповідно.

Значення ΔU_H можна визначити, знаючи I_{CTmax} , I_{CTmin} та динамічний опір. U_{HCP} взяти таким, що дорівнює середньому значенню U_{CT} .

4. Нарисувати у «підготовці» до звіту схему з необхідними приладами для зняття ВАХ стабілітрону. Амперметр та вольтметр рекомендовано ввімкнути так як зображено на рис. 17Б.3.

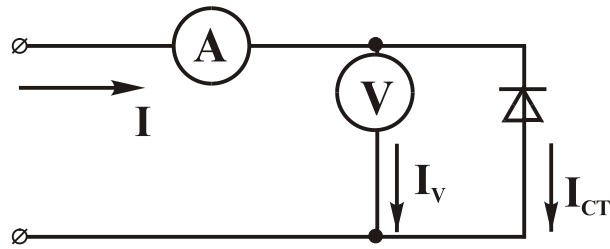


Рисунок 17Б.3

У цьому випадку через амперметр протікає струм $I=I_V+I_{CT}$. Струм I_V можна визначити по шкалі вольтметра, знаючи що I струм повного відхилення на всіх діапазонах змін за напругою дорівнює 1 мА. Тоді $I_{CT}=I-I_V$.

Для регулювання напруги у лабораторній роботі використовується реостат, ввімкнений подільником напруги.

Передбачити у схемі для зняття ВАХ регулювання напруги, а також ключ для підключення напруги живлення.

5. Нарисувати схему стабілізатора із приладами для вимірювання U_I та U_H (див. рис. 17Б.1). Як баластний опір R_6 у стабілізаторі використовується набір з опорів $R_1...R_5$, які є на лабораторному стенді.

6. Підрахуйте, з яких опорів можна скласти R_6 для вашого стабілізатора, якщо $R_1=100$ Ом, $R_2=R_5=36$ Ом кожний.

Резистори R_3 та R_4 з'єднані як на рис. 17Б.4. $R_3=72$ Ом, $R_4=36$ Ом.

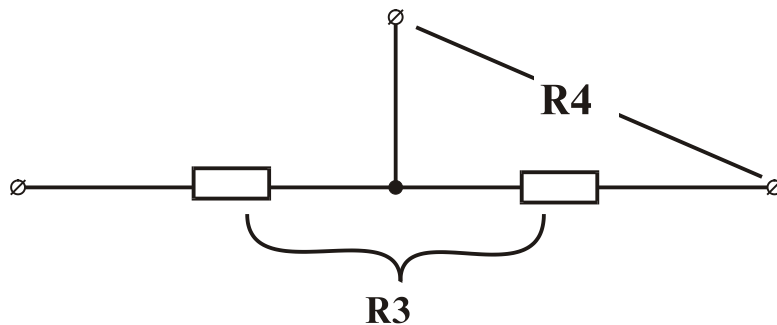


Рисунок 17Б.4

7. Заготувати 2 листи міліметрового паперу того ж формату, що й папір для звіту по лабораторній роботі.

Порядок виконання роботи

1. Зняти ВАХ стабілітрона. При цьому потрібно уважно слідкувати за тим, щоб струм через стабілітрон не перевищив значення I_{max} . В іншому випадку він вийде з ладу. Тому, перед початком досліду, потрібно повзунок реостата встановити так, щоб після підключення до кола напруга

на стабілітроні дорівнювала нулю. Обов'язково зафіксувати значення напруги U , що відповідає $I_{CT\max}$.

2.2. Скласти схему стабілізатора із приладами для визначення U , та U_H . Як опір навантаження стабілізатора взяти на лабораторному стенді R_6 (він вказаний у таблиці R_H), як баластний R_6 – набрати з $R_1 \dots R_5$. Джерело напруги має свій вимикач.

2.3. Визначити дослідним шляхом межі зміни U_1 у режимі стабілізації. При проведенні досліду струм через стабілітрон не має перевищувати $I_{CT\max}$. Записати значення $U_1 = U_{1\max}$, яке відповідає $I_{CT\max}$. Порівняти з межами, знайденими у п. 2.1.

2.4. Зняти залежність U_1 від U_H . Слідкувати за тим, щоб струм через стабілітрон не перевищував $I_{CT\max}$.

Обробка результатів досліду

1. На одному рисунку побудувати ВАХ стабілітрона, R_6 та R_H . На цьому ж рисунку побудувати результуючу ВАХ $U_1(I)$, використовуючи ВАХ стабілітрона, R_6 та R_H .

2. На другому рисунку побудувати залежність, використовуючи побудови з попереднього пункту. Тут само побудувати $U_H(U_1)$, яку знято експериментально. Порівняти залежності $U_H(U_1)$, отримані двома способами. Зробити висновки.

3. Визначити коефіцієнт стабілізації, використовуючи криву $U_H(U_1)$, отриману експериментально. Порівняти його зі значенням, отриманим у п. 1.3.

4. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Що називається параметричним стабілізатором напруги?
2. Для чого в параметричному стбілізаторі напруги використовується баластний опір?
3. Як визначити коефіцієнт стабілізації стабілізатора і що він показує?
4. Як побудувати результуючу ВАХ елементів, з'єднаних послідовно, паралельно, змішано?
5. Як графічно визначити коефіцієнт стабілізації стабілізатора?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 18

ДОСЛІДЖЕННЯ КОТУШКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ СЕРДЕЧНИКОМ

Мета роботи: дослідити вплив режимів роботи котушки з феромагнітним сердечником (*ferromagnetic core inductor*) на її еквівалентні параметри.

Теоретичні відомості

Котушка без феромагнітного сердечника є лінійний елемент (*linear element*) електричного кола; повний опір (*impedance*) z – величина стала, що не залежить від струму.

З введенням феромагнітного сердечника котушка стає нелінійним елементом. Її нелінійні властивості зумовлені нелінійною залежністю між магнітною індукцією (*magnetic induction*) B та напруженістю магнітного поля (*intensity of magnetic field*) H в сердечнику, котра зображається замкнутою кривою (петлею). (рис. 18.1).

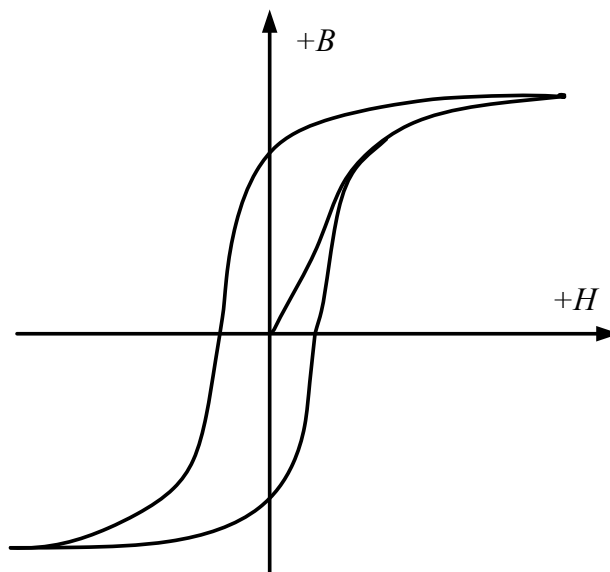


Рисунок 18.1

Якщо прикласти до котушки *синусоїдну напругу* (*sinusoidal current*), то індукція і напруженість магнітного поля котушки в загальному випадку є несинусоїдні функції часу.

Для спрощення аналізу процесів в колі з такою котушкою часто несинусоїдні напругу, струм, індукцію замінюють еквівалентними синусоїдами. Тоді залежність між *миттєвими значеннями* (*instant value*) B та H описується еліпсом (рис. 18.2), площа якого при тому ж значенні струму дорівнює площі петлі перемагнічування (рис. 18.1).

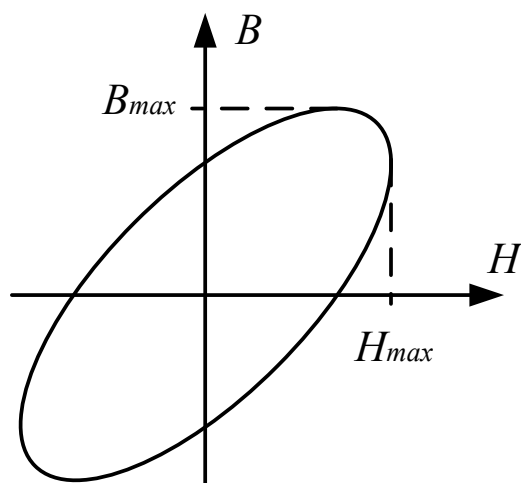


Рисунок 18.2

Площа петлі визначає в масштабі енергію, яка витрачається джерелом електричної енергії на перемагнічування одиниці об'єму сердечника. Частина енергії витрачається на *гістерезис (hysteresis)*, частина – на *вихрові струми (foucault currents)*. Явище нагрівання сердечника внаслідок гістерезису та протікання вихрових струмів враховується на схемі заміщення котушки введенням опору втрат в сталі, який може вмикатись послідовно або паралельно з котушкою.

При наближених розрахунках кіл зі сталлю користуються не петлею перемагнічування, а основною кривою намагнічування $B(H)$ або $B_m(H_m)$, зображеною на рис. 18.3.

Індукція B та напруженість H котушки, з малим активним опором та сердечником без проміжку, пов'язані зі струмом та напругою співвідношеннями:

$$U = Wd\Phi/dt = WSdB/dt; \quad H = iW/l,$$

де W – число витків котушки;

l – довжина середньої магнітної лінії;

S – площа перерізу сердечника.

З наведених співвідношень видно, що при синусоїдній напрузі індукція в сердечнику синусоїдна, тобто пропорційна напрузі; напруженість також пропорційна струму. Тому для такої котушки вольт-амперна характеристика $U(I)$ буде такою самою, як і $B_m(H_m)$ (рис. 18.4.). Точка m на кривих $B_m(H_m)$ та $U(I)$ є точкою перегину.

По кривій $U(I)$ легко встановити залежність повного опору Z котушки від струму: $Z = U/I$. Для реальної котушки більш точну залежність $Z(I)$ можна знайти за показами приладів.

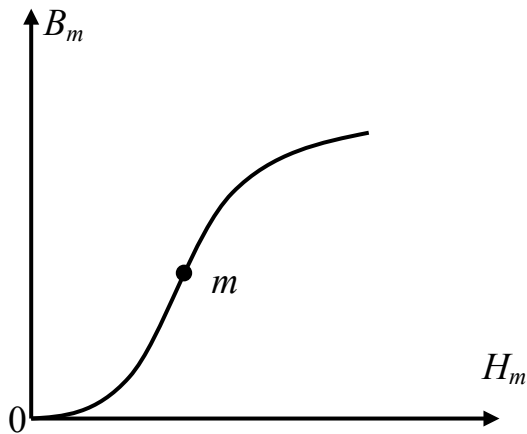


Рисунок 18.3

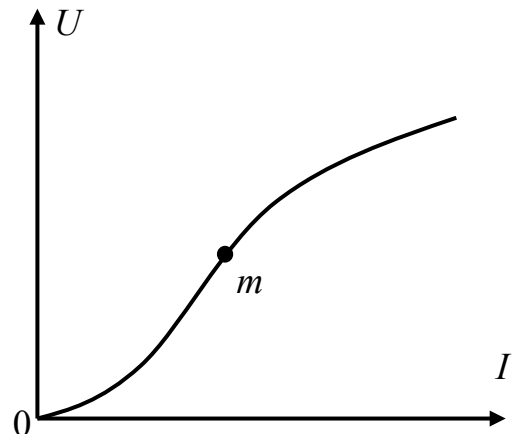


Рисунок 18.4

Схема заміщення котушки зображена на рис. 18.5. В ній опір втрат в сталі ввімкнений послідовно з котушкою.

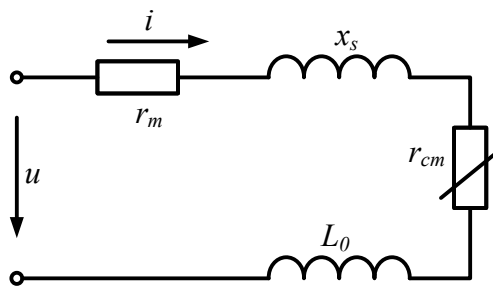


Рисунок 18.5

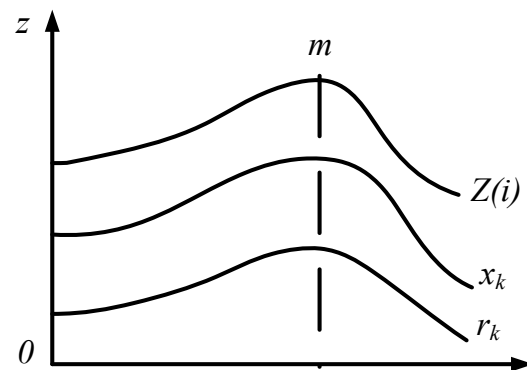


Рисунок 18.6

Елементи схеми:

r – опір міді (обмоточного провідника);

X_S – лінійний опір індуктивності розсіювання (*stray inductance*);

r_{cm} – опір втрат в сталі;

L_o – основна нелінійна індуктивність котушки, зумовлена магнітним потоком (*magnetic flow*) в сердечнику.

За відсутності проміжку в сердечнику індуктивністю розсіювання можна знехтувати (порівняно з основною індуктивністю). Тоді реактивний опір (*reactive resistance*) котушки $X_k = W / L_o$. Індуктивність:

$$L_0 = \frac{\psi_0}{i} = \frac{WSB_0}{i} \approx \frac{WSB_T}{I_T}. \quad (18.1)$$

З кривої $B_m(H_m)$ (рис. 18.3) видно, що до точки перегину m індукція зростає швидше, ніж напруженість, тому на підставі (18.1) можна дійти висновку, що до точки m індуктивність L_0 зростає, тобто збільшується реактивний опір котушки. $X_k = \omega L_0$. Після точки m зростання індукції сповільнюється – опір X_k зменшується. Залежність $X_k(I)$ зображена на рис. 18.6.

Активний опір котушки $r_k = r_m + r_{cm}$. На низьких частотах $r_m = const$. Потужність втрат в сердечнику P_{cm} наближено можна вважати пропорційною квадрату максимальної індукції або квадрату напруги. Тому

$$r_{cm} = \frac{P_{cm}}{I^2} = \frac{k_1 B_m^2}{I^2} = \frac{k_2 U^2}{I^2} = k_2 Z^2, \quad (18.2)$$

$$P_k = P_m + k_2 Z^2. \quad (18.3)$$

Залежності Z , X_k та r_k від струму діючого значення змінного струму (*operating value of an alternating current*) I зображені на рис. 18.6.

В даній лабораторній роботі використовують котушки, матеріал сердечників яких має дуже короткий відрізок кривої $B_m(H_m)$ (на рис. 18.3 від точки 0 до точки m). З допомогою приладів, що використовуються в роботі, цей відрізок отримати неможливо, тому на експериментальних графіках отримують тільки відрізки залежностей Z , X_k , r_k розташовані правіше точки m .

Залежність $\cos \varphi(I)$ можна отримати таким чином:

$$\cos \varphi(I) = \frac{P}{UI} = \frac{(r_m I^2 + P_{cm})}{I U} = \frac{r_m}{Z(I)} + k_2 Z(I). \quad (18.4)$$

Графічно ця залежність зображена на рис. 18.7.

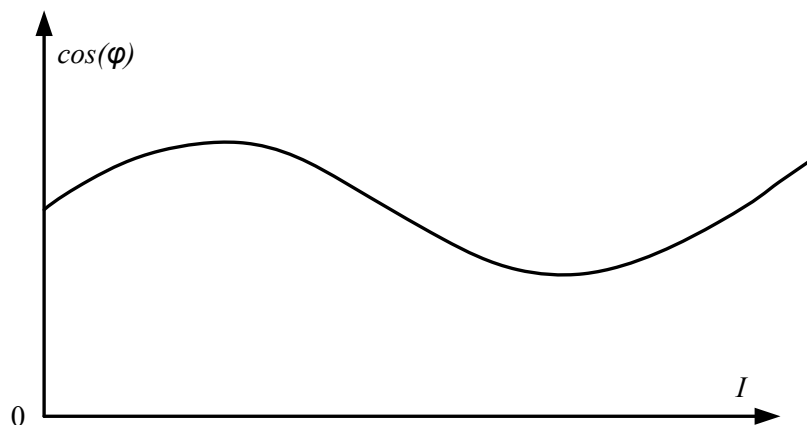


Рисунок 18.7

Залежність струму та параметрів котушки від проміжку

При дослідженні цих залежностей прикладена до котушки напруга залишається незмінною. За цієї умови та малих змінах проміжку δ (рис. 18.8) індукція, потік та напруженість в сердечнику також є незмінними (з амплітудою).

На підставі закону повного струму (*rms current law*) при сталому перерізі сердечника можна записати:

$$H_{cm}l_{cm} + H_{\delta}l_{\delta} = IW \quad (18.5)$$

де H_{cm} і H_{δ} – напруженості магнітного поля відповідно в сердечнику та повітряному проміжку;

l_{cm} і l_{δ} – середні довжини відповідно сталевого та повітряного відрізка магнітного кола.

З (18.5)

$$I = \frac{(H_{cm}l_{cm} + H_{\delta}l_{\delta})}{W} = \frac{H_{cm}l_{cm}}{W} + \frac{H_{\delta}l_{\delta}}{W} = I(0) + \frac{H_{\delta}l_{\delta}}{W}. \quad (18.6)$$

При невеликих змінах проміжку, коли $\delta \leq l_{cm}$, величини $l_{cm}, H_{cm}; l_{cm}$ можна вважати постійними, тому струм I зростає пропорційно δ (рис. 18.9). Проте прямий зв'язок між I та δ існує тільки при малих δ , коли потоки розсіювання невеликі. Із зростанням δ зростання струму сповільнюється.

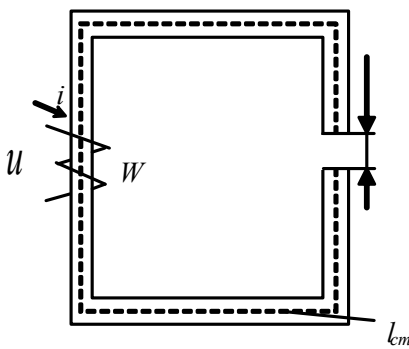


Рисунок 18.8

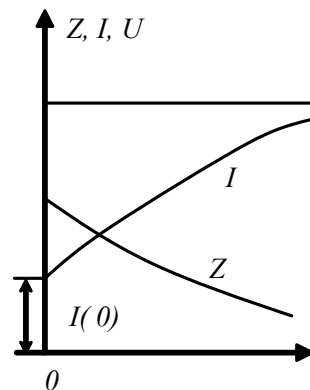


Рисунок 18.9

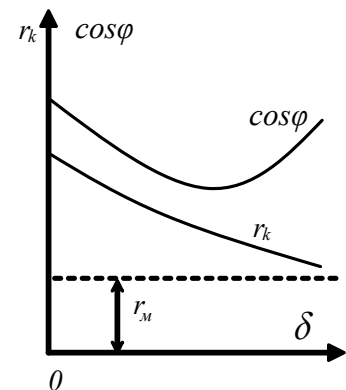


Рисунок 18.10

Маючи залежність $I(\delta)$ та враховуючи, що прикладена напруга незмінна, легко визначити $Z(\delta)$ (рис. 18.9).

Із збільшенням проміжку індукція та об'єм сердечника не змінюються, тобто, P_{cm} також не змінюється. При цьому струм

збільшується, $r_{cm} = \frac{P_{cm}}{I^2}$ зменшується, отже, r_k також зменшується (рис. 18.10).

Індуктивність $L_o = \frac{WSB}{I}$ із збільшенням проміжку зменшується, тому $X_k = \omega L_o$ також зменшується, але інакше, ніж r_k , тому $\cos\varphi$ величина змінна (рис. 18.10).

Максимальне значення індукції в сердечнику можна визначити за формулою:

$$B_m = \frac{U}{4,44 fSW}. \quad (18.7)$$

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему (рис. 18.11). (Котушку та амперметр, що їй відповідає, взяти за вказівкою викладача).

2. Зняти покази приладів при зміні струму від 0 до верхньої границі амперметра для двох проміжків:

- 1) $\delta = 0$;
- 2) $\delta = 4$ мм.

Увага! Перед вмиканням кола під напругу ручка ЛАТРа має стояти на «0»!

Результати вимірювань (8–10 точок) занести до табл. 18.1.

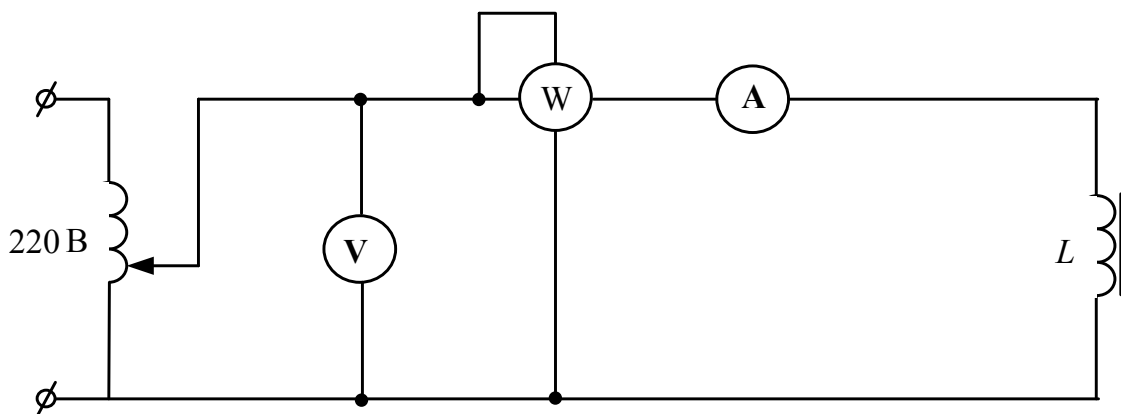


Рисунок 18.11

3. При незмінній напрузі U (30% напруги, максимальної в першому досліді при $\delta = 0$), зняти показання приладів, змінюючи повітряний проміжок δ від 0 до 10мм через 1 мм. Результати вимірювань занести до табл. 18.1.

Таблиця 18.1

Вимірювання					Обчислення				
Номер точки	δ	U	I	P	Z	r_k	X_k	L_o	$\cos\varphi$
	мм	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	-
	0		0,5						
	0		1,0						
	0		1,5						
	0		2,0						
	0		2,5						
	0		3,0						
	0		3,5						
	0		4,0						
	0		4,5						
	0		5,0						
	4		0,5						
	4		1,0						
	4		1,5						
	4		2,0						
	4		2,5						
	4		3,0						
	4		3,5						
	4		4,0						
	4		4,5						
	4		5,0						
	0								
	2								
	4								
	6								
	8								
	10								

Обробка результатів дослідів

1. За даними вимірювань (табл. 18.1) обчислити і занести до цієї ж таблиці повний Z , активний r_k , реактивний X_k опори та $\cos\varphi$.
2. Побудувати в одній системі координат залежності U , Z , r_k та $\cos\varphi$ від струму через котушку I .
3. Побудувати в одній системі координат залежності Z , r_k , X_k , I , $\cos\varphi$ від повітряного проміжку δ .

4. Визначити прикладену до котушки напругу, при якій в сердечнику створюється індукція $B = 0,6$ Тл. Визначити при цьому втрати на гістерезис та вихрові струми.

5. Проаналізувати отримані залежності.

Контрольні запитання

1. Як впливає зміна частоти на форму петлі перемагнічування?

2. В чому різниця між динамічною петлею перемагнічування та статичною?

3. Як пояснити нелінійність залежності напруги на клемі котушки з сердечником та струму?

4. Як відрізняється форма кривих струму через котушку в двох випадках:

а) активний опір кола живлення котушки значно менший реактивного;

б) активний опір значно більший реактивного?

В обох випадках напруга, прикладена до клем котушки, синусоїдна і незмінна по амплітуді.

5. Що означає опір втрат в сталі?

6. Методика зняття залежності струму I від проміжку δ .

7. Пояснити хід залежності $Z(I)$ для котушки з сердечником.

8. Нарисувати і пояснити хід залежності $L_o(I)$.

9. Пояснити залежність струму I від проміжку δ при $U = const$.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 19

ФЕРОРЕЗОНАНС НАПРУГ

Мета роботи: експериментально дослідити явища, що виникають в колі при послідовному з'єднанні котушки з сердечником та конденсатора.

Теоретичні відомості

Резонанс в колі, що має котушку з ферромагнітним сердечником, з'єднану послідовно або паралельно з конденсатором, називають *ферорезонансом* (*ferroresonance*).

На відміну від лінійного електричного кола, в нелінійному колі з ферромагнітним елементом можливі зміни знака кута зсуву фаз між основними гармоніками напруги та струму при зміні напруги (або струму) джерела живлення.

При аналізі явища ферорезонансу з метою спрощення несинусоїдні напруги та струми в котушці замінюють еквівалентними синусоїдами.

Для такого кола (рис. 19.1) за другим законом Кірхгофа

$$u = ri + \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{c} \int i dt, \quad (19.1)$$

де r – опір обмотки котушки та втрат в сталі; ψ – повне магнітне потокозчеплення.

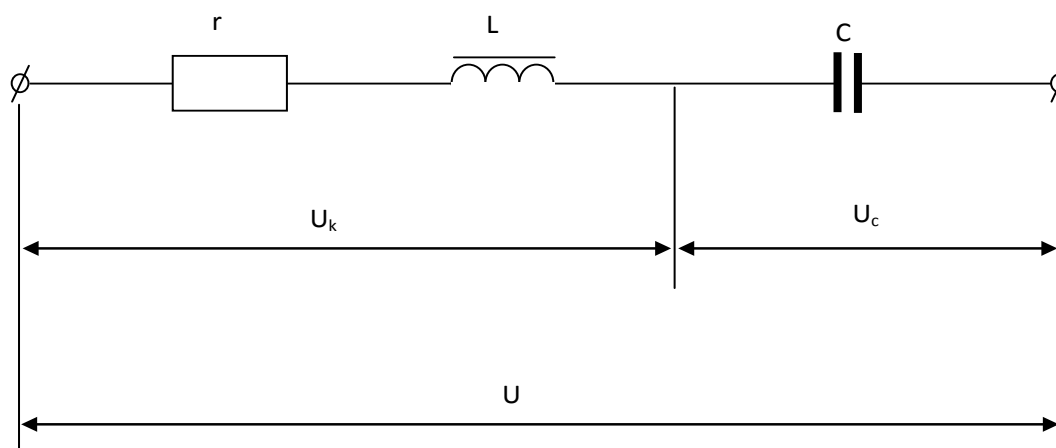


Рисунок 19.1

При синусоїдній напрузі струм i та магнітний потік будуть несинусоїдними.

Несинусоїдність струму та потоку ускладнює аналіз та розрахунок кола. Якщо знехтувати малими активними опорами обмотки r та втратами

в сталі P_{cm} і замінити несинусоїдні криві струму та потоку еквівалентними синусоїдними, то можна записати рівняння (19.1) так:

$$\underline{U} = j\omega\Psi - j\frac{I}{\omega c} = \underline{U}_k + \underline{U}_c \quad (19.2)$$

Напруги U_k та U_c можна вважати функціями струму. Тоді залежність $U_k = f_1(I)$ можна зобразити нелінійною характеристикою котушки, залежність $U_c = f_2(I)$ – прямою, що проходить через початок координат. Сумарну криву $U = f(I)$ отримаємо, віднімаючи від ординат кривої $U_k = f_1(I)$ відповідні координати прямої $U_c = f_2(I)$ (рис. 19.2), тому що з урахуванням вказаних допущень напруги U_k та U_c будуть знаходитися в протифазі.

Як видно з рис. 19.2, при $U < U_{max}$ одному значенню напруги U відповідають три значення струму – I_1, I_2, I_3 .

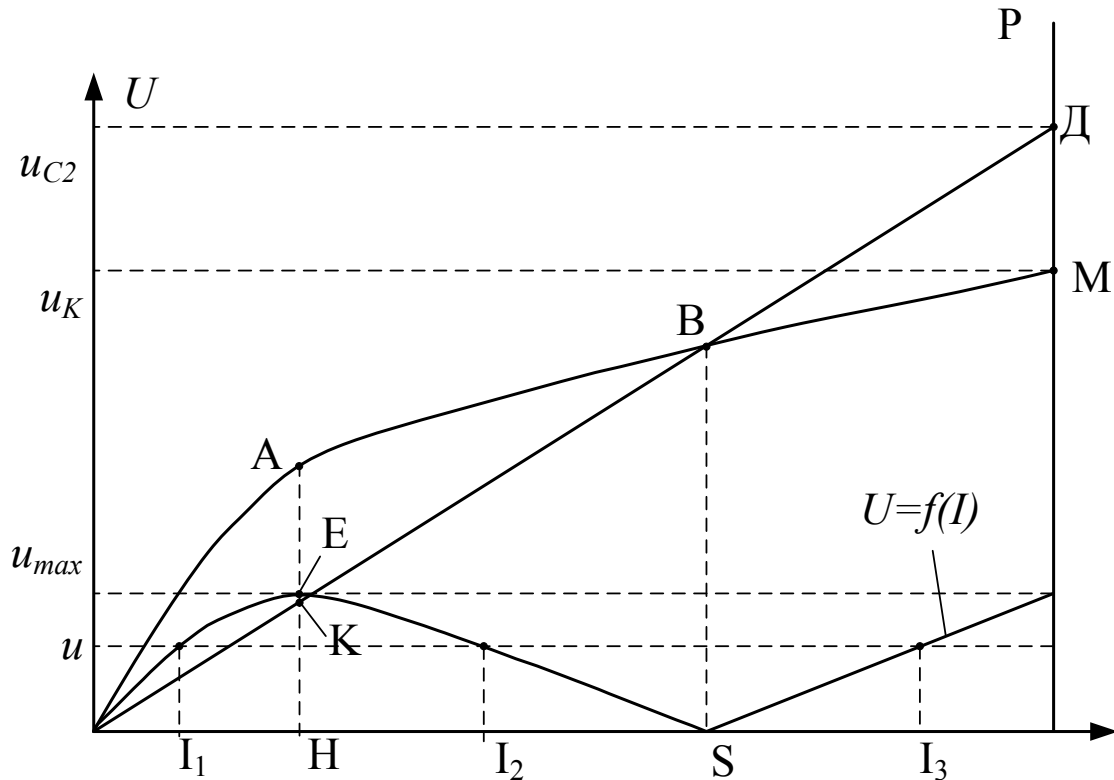


Рисунок 19.2

Дві перші точки відповідають індуктивному характеру кола, точка 3 – ємнісному характеру кола. Особлива точка S характеристики $U = f(I)$, що лежить на осі абсцис, є точкою резонансу, тому що в цій точці напруги U_k та U_c взаємно компенсуються, тобто виконується умова $\omega L = \frac{1}{\omega c}$. Тобто, при послідовному з'єднанні котушки з сердечником та конденсатора резонансу можна досягти, змінюючи прикладену напругу.

Якщо врахувати в колі втрати та вищі гармоніки, якими ми раніше знехтувати, то фактична характеристика кола набирає вигляду на рис. 19.3.

Поступово збільшуючи напругу (при живленні кола від джерела ЕРС), ми дійдемо до точки а характеристики, потім буде стрибок в точку b, який супроводжується сильним збільшенням струму в колі та напруг на окремих ділянках. При подальшому збільшенні напруги збільшення струму протікає повільно. При зниженні напруги струм повільно зменшується до точки с, з якої знову стрибком зменшується до значення в точці d. Разом із струмом різко зменшуються напруги на окремих ділянках кола.

При постійній напрузі на вході кола спадна частина характеристики є ділянкою несталених режимів.

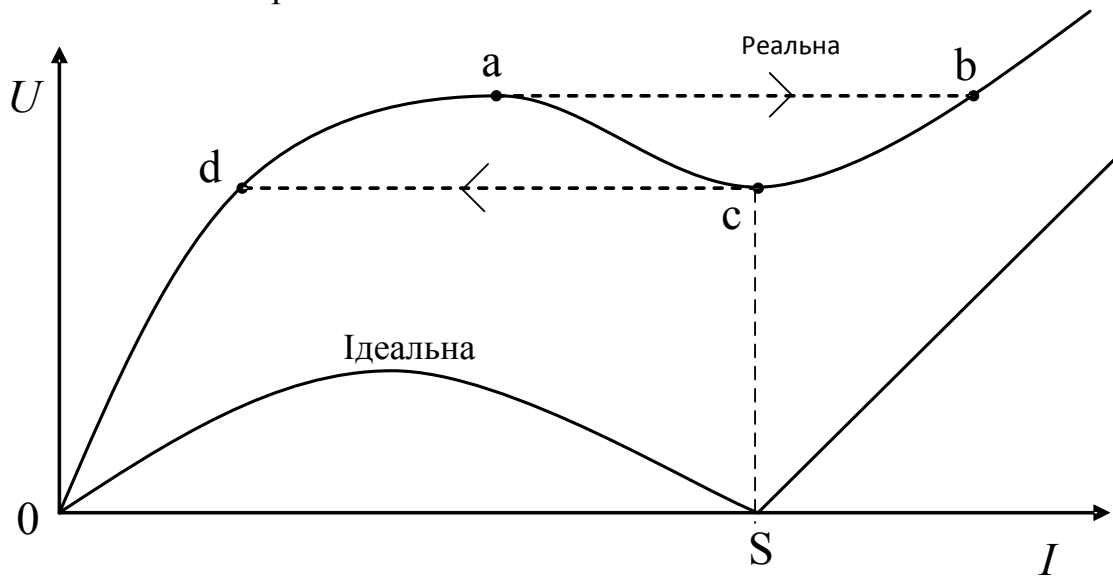


Рисунок 19.3

Оскільки для ділянки 0-а-с характеристики (рис. 19.3) $U_k > U_c$ і зсув фаз $\varphi > 0$, а для ділянки с-в $U_k < U_c$ і $\varphi < 0$, то вказані різкі переходи супроводжуються зміною знака кута зсуву фаз (перевертання фази).

Із збільшенням активного опору крива напруги $U(I)$ вирівнюється і при достатньо великому активному опорі кола загальна ВАХ може не мати «спадної ділянки». Це означає, що при живленні кола від джерела струму (який має нескінченно великий опір) стрибків струму не буде.

Електричні кола, які мають послідовно з'єднані котушку з феромагнітним сердечником та ємність, є основною складовою ферорезонансних стабілізаторів напруги.

В цій лабораторній роботі для котушки з сердечником потрібно визначити ємність, при якій струм в колі після стрибка буде мати задане викладачем значення. Зробити це можна графічно.

Поглянемо на рис. 19.2, на якому показані: крива 0ABM – ВАХ котушки; пряма 0КВД – ВАХ конденсатора; крива 0ESF – ВАХ послідовно з'єднаних котушки та конденсатора (побудована для еквівалентних

синусоїд). Із побудови очевидна рівність відрізків: $AK = EN = FN$. Підбираючи положення прямої NP відповідним чином, можна досягти рівності $DM = AK$. Відрізок EN відповідає вхідній напрузі, при якій виникне стрибок струму; з іншого боку, відрізок AK відповідає найбільшій відстані по вертикалі між $BA\chi$ котушки (на ділянці $0AB$) та $BA\chi$ конденсатора.

З урахуванням сказаного, розрахунок ємності можна виконати так: на графіку з побудовою $BA\chi$ котушки відкладаємо задане значення струму I_4 . Проводимо лінію NP паралельно осі ординат. Підбираємо таке положення прямої $OKBD$, щоб відрізок DM на прямій NP дорівнював максимальній відстані AK по вертикалі між прямою $OKBD$ та $BA\chi$ котушки. В цьому випадку пряма $OKBD$ є $BA\chi$ конденсатора. Визначаємо на цій $BA\chi$ координати будь-якої точки. Наприклад, для точки D координатами на рис. 19.2 є струм I_4 та напруга U_{c2} . Тоді $X_c = \frac{U_{c2}}{I_4} = \frac{1}{\omega C}$, звідки знаходимо ємність C .

Ця методика дозволяє приблизно визначити значення ємності, проте дає можливість визначити порядок різних величин та вибрати необхідні прилади.

Порядок виконання роботи

1. Зняти та побудувати $BA\chi$ котушки із сталевим сердечником (варіант вказує викладач).

2. Визначити значення ємності, яку необхідно ввімкнути послідовно з котушкою, щоб після характерного для ферорезонансу напруг стрибка струму значення струму дорівнювало вказаному викладачем (після показу $BA\chi$ котушки).

3. Скласти схему для зняття $BA\chi$ послідовно з'єднаних котушки із сталевим сердечником та конденсатора (рис. 19.4). Прилади та їх границі вибирати згідно з п. 2.

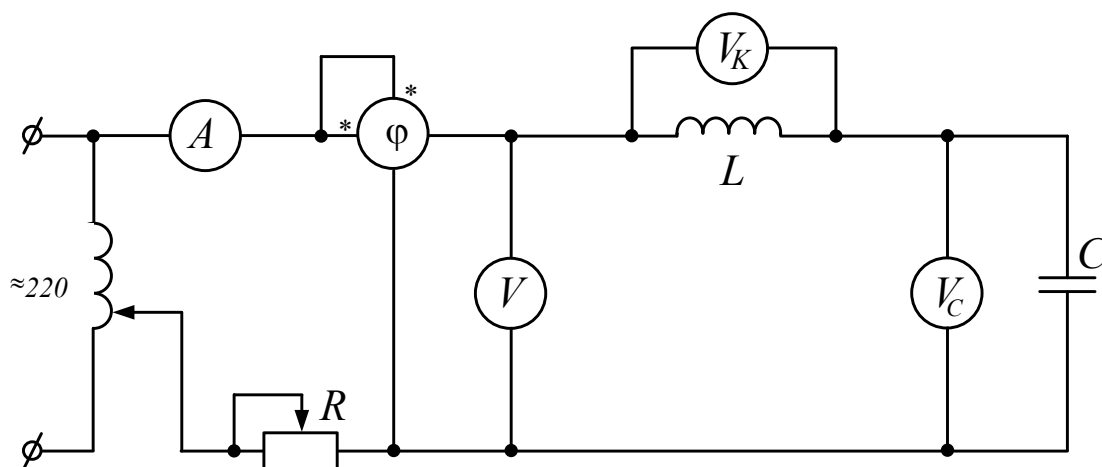


Рисунок 19.4

4. Вивести реостат ($R=0$) та виміряти всі величини, вказані в табл. 19.1, при повільному збільшенні та зменшенні вхідної напруги. Особливо ретельно треба виміряти напругу та струм безпосередньо до та після стрибка струму. Результати вимірювань занести до табл. 19.1.

5. Дослідним шляхом встановити мінімальне значення додаткового опору (реостат R), за якого відсутній стрибок струму в колі при повільному збільшенні напруги живлення. (За необхідності послідовно з реостатом ввімкнути опори на стенді $R=100; 75; 30$ Ом).

6. Встановити необхідне мінімальне значення опору (п. 5) і виконати виміри аналогічно п. 4 при повільному збільшенні струму в колі. Дані вимірів занести до табл. 19.1.

Таблиця 19.1

Номер точки	I	U	U_L	U_C	φ
	A	В			град.

Обробка результатів дослідження

1. За даними дослідів пунктів 1, 2 побудувати в одній системі координат ВАХ:

- котушки із сталевим сердечником;
- конденсатора;
- усього кола, отриману як різницю ординат ВАХ котушки і конденсатора.

2. За результатами вимірів пунктів 4, 6 в тій же системі координат побудувати криві залежностей струму та напруги на котушці і напруги на конденсаторі від загальної напруги. Пояснити стрибок струму в колі.

3. Порівняти три ВАХ усього кола пунктів 1 та 2.

4. Розглядаючи коло як стабілізатор напруги, визначити коефіцієнт стабілізації (див. методичні вказівки до лабораторної роботи № 17).

5. Побудувати в масштабі *векторні діаграми (vector diagram)* для трьох випадків:

а) $\varphi > 0$; б) $\varphi = 0$; в) $\varphi < 0$.

6. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Що називається ферорезонансом?

2. Чи можна досягти резонансу в колі, що складається з послідовно з'єднаних:

а) активного опору, котушки без сердечника і конденсатора тільки зміною прикладеної до входу кола напруги?

б) в колі, що має котушку з осердям і ті ж самі r і C ? Чому?

3. Як пояснити наявність стрибків струму при ферорезонансі?

4. Як визначити ємність, необхідну для отримання заданого значення струму після стрибка?

5. Чому стрибки струму зникають із збільшенням активного опору кола?

6. Які припущення щодо форми струмів та напруг роблять при аналізі явища ферорезонансу?

7. Що таке коефіцієнт стабілізації і як його визначити в лабораторній роботі?

8. Як змінюється зсув по фазі між прикладеною до входу кола напругою і струмом при збільшенні напруги? Проілюструвати на векторних діаграмах.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 20

ОДНОФАЗНИЙ ТРАНСФОРМАТОР З ФЕРОМАГНІТНИМ СЕРДЕЧНИКОМ

Мета роботи: дослідити роботу однофазного трансформатора з феромагнітним сердечником в нелінійному режимі із застосуванням методу еквівалентних синусоїд і визначити параметри схеми заміщення трансформатора.

Теоретичні відомості

На рис. 20.1 схематично зображено трансформатор з сердечником із феромагнітного матеріалу. Де W_1 і W_2 – число витків відповідно первинної та вторинної обмоток; Φ_0 – основний магнітний потік; Φ_{S1} та Φ_{S2} – потоки розсіювання відповідно первинної та вторинної обмоток; r_1 та r_2 – активні опори відповідно первинної та вторинної обмоток.

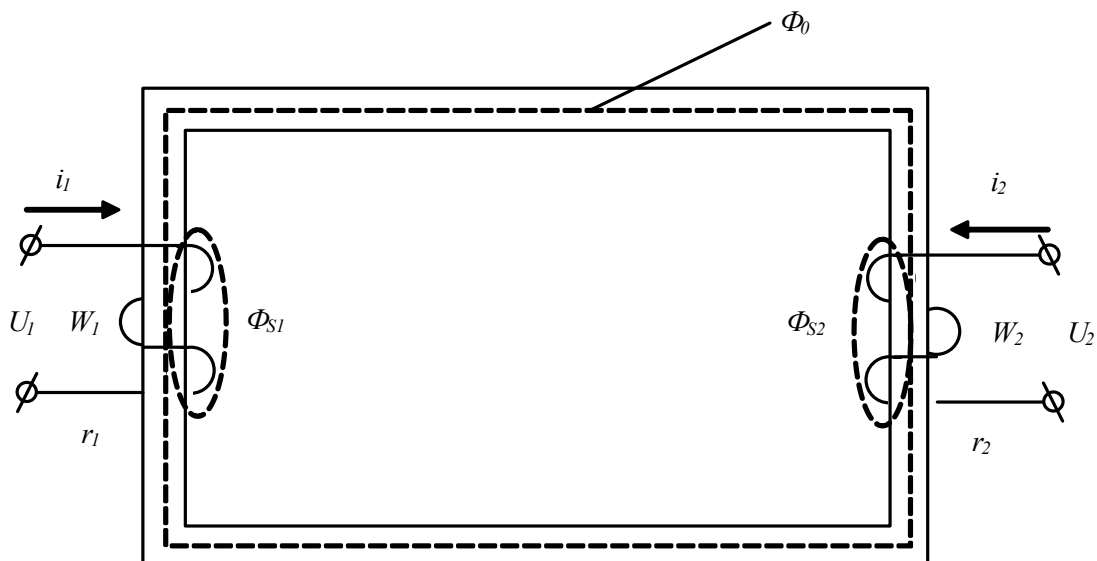


Рисунок 20.1

Первинні та вторинні напруги та струми позначені відповідними індексами. Потоки розсіювання Φ_{S1} і Φ_{S2} замкнені частково в повітрі, тому залежність їх від струмів i_1 і i_2 лінійна. Основний потік Φ_0 замкнений повністю в феромагнітному середовищі і пов'язаний з результувальною намагнічувальною силою (тобто струмами) нелінійною залежністю внаслідок нелінійності характеристики намагнічування матеріалу сердечника. Це означає, що при синусоїдній первинній напрузі U_1 криві струмів i_1 та i_2 будуть несинусоїдні. Зважаючи на це, потікозчеплення котушок можна записати так:

$$\psi_{S1} = \psi_{S1} + \psi_{01} = L_{S1} i + w_1 \Phi_0, \quad (20.1)$$

$$\psi_{s2} = \psi_{s2} + \psi_{02} = L_{s2} i + w_2 \Phi_0. \quad (20.2)$$

Тут L_{s1} і L_{s2} – індуктивність відповідно первинної та вторинної обмоток, які визначаються потоками розсіювання.

Струм у вторинному колі виникає під дією ЕРС $e_2 = W_2 \frac{d\Phi_0}{dt}$. На підставі другого закону Кірхгофа для первинного та вторинного контурів можна записати рівняння:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + W \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad (20.3)$$

$$e_1 = i_2 r_2 + L_{s2} \frac{di_2}{dt} + u_2, \quad (20.4)$$

де u_2 – напруга на навантаженні;

$$u_2 = -W_2 \frac{d\Phi_0}{dt}.$$

Диференціальні рівняння (20.3) та (20.4) нелінійні внаслідок нелінійної залежності між напругою (поток) та струмом (напруженістю). Розв'язування цих рівнянь аналітичним методом досить громіздке і не може бути точним внаслідок неминучих похибок при апроксимації характеристики. В цьому випадку доцільно застосувати метод еквівалентних синусоїд, що дозволить записати рівняння в комплексній формі:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 r_1 + j\omega L_{s1} \underline{I}_1 + j\omega W_1 \underline{\Phi}_0, \quad (20.5)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2 r_2 + j\omega L_{s2} \underline{I}_2 + \underline{U}_2. \quad (20.6)$$

В трансформаторі з сердечником сума напруг $(\underline{I}_1 r_1 + j\omega L_{s1} \underline{I}_1)$ за модулем значно менша за напругу $\omega W_1 \Phi_0$ із (20.5). Тому при $U_1 = const$ потік Φ_0 і відповідна йому напруга $U_0 = \omega W_1 \Phi$ залишаються практично незмінними в широких межах, зокрема і в режимі холостого ходу. Як наслідок цього, результуюча ЕРС в усіх режимах залишається незмінною:

$$\underline{I}_1 W_1 + \underline{I}_2 W_2 = \underline{I}_0 W_1 \quad (20.7)$$

де I_0 – струм холостого ходу трансформатора.

Схема заміщення та векторна діаграма трансформатора

Для зручності аналізу процесів в трансформаторі виконують приведення числа витків вторинної обмотки до числа витків первинної обмотки, тобто приймають число витків вторинної обмотки приведенного трансформатора $W'_2 = W_1$. При цьому не повинні змінюватись: режим і параметри первинного контура; потужність, що передається з первинного контура у вторинний; результуюча ЕРС, для чого повинна виконуватись рівність $I_2 W_2 = I'_2 W'_2$, де I'_2 – приведений вторинний струм.

Якщо позначити відношення $\frac{W_1}{W_2} = k$ (k – коефіцієнт трансформації) і врахувати, що $W_1 = W'_2$ з рівності $I_2 W_2 = I'_2 W'_2$ маємо:

$$I'_2 = \frac{I_2 W_2}{W'_2} = \frac{I_2}{k}.$$

При цій умові, ЕРС наведені в обмотках основним магнітним потоком Φ_0 , будуть однакові (E_1 та E'_2). Але $\underline{E}_1 = -j\omega W_1 \underline{\Phi}_0$, а $\underline{E}_2 = -j\omega W_2 \underline{\Phi}_0$, звідки $\frac{E'_2}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}$ або $E'_2 = kE_1$.

Підставимо E_2 та I_2 , виражені через приведені величини, в рівняння (20.6) і отримаємо:

$$\underline{E}'_2 = \underline{I}'_2 k^2 r_2 + \underline{I}'_2 j\omega k^2 L_{S2} + k \underline{U}_2. \quad (20.8)$$

Позначимо $r'_2 = k^2 r_2$; $L'_{S2} = k^2 L_{S2}$ та $U'_2 = kU_2$.

Рівняння (20.5), (20.7) та (20.8) зводимо в одну систему з урахуванням зроблених позначок:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 r_1 + \underline{I}_1 j\omega L_{S1} + \underline{U}_1, \quad (20.9)$$

$$\underline{E}'_2 = \underline{I}'_2 r'_2 + \underline{I}'_2 j\omega L'_{S2} + \underline{U}_2, \quad (20.10)$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2. \quad (20.11)$$

Цій системі рівнянь відповідає схема заміщення трансформатора (рис. 20.2) в якій магнітний зв'язок між первинним і вторинним контурами замінений електричним.

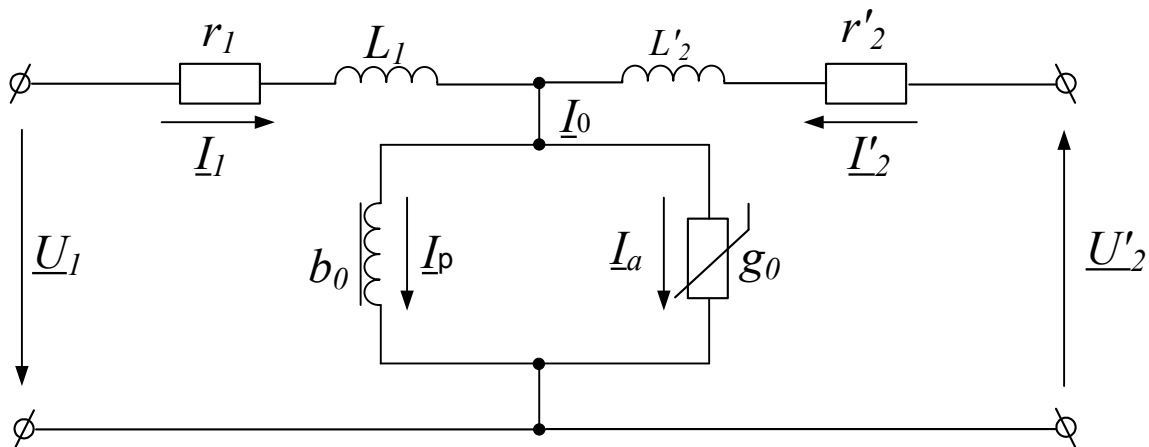


Рисунок 20.2

Струм I_0 в схемі заміщення показаний за *першим законом Кірхофа (Kirchhoff current law)* у вигляді суми двох струмів:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_p + \underline{I}_a,$$

де I_p – намагнічувальний струм, що визначає основний потік;

I_a – струм, що визначає втрати в сталі.

На рис. 20.3 показано векторну діаграму приведеного трансформатора, навантаженого на опір активно-індуктивного характеру ($\varphi_H > 0$).

Параметри схеми заміщення можна визначити із *дослідження холостого ходу (open-circuit test)* та *дослідження короткого замикання (short-circuit test)*.

Дослід холостого ходу

При роботі трансформатора в номінальному режимі значення спаду напруги на елементах r_1 та ωL_{S1} становить 2 – 3%, а в режимі холостого ходу при струмі $I_1 = I_0 = (0,02 - 0,1)I_{1H}$ 0,2 – 0,3% номінальної напруги U_{1H} . Тому можна з достатньою точністю прийняти умову $U_1 \approx U_0$. Це означає, що в режимі холостого ходу активна потужність (*active power*), яку споживає трансформатор, визначається розміром втрат в сталі. Тому для активної *провідності (conductivity)* можна записати:

$$g_0 = \frac{P_{cm}}{U_1}.$$

Для повної провідності маємо $Y = I_0/U_1$, тоді $b = \sqrt{Y^2 - g_0^2}$.

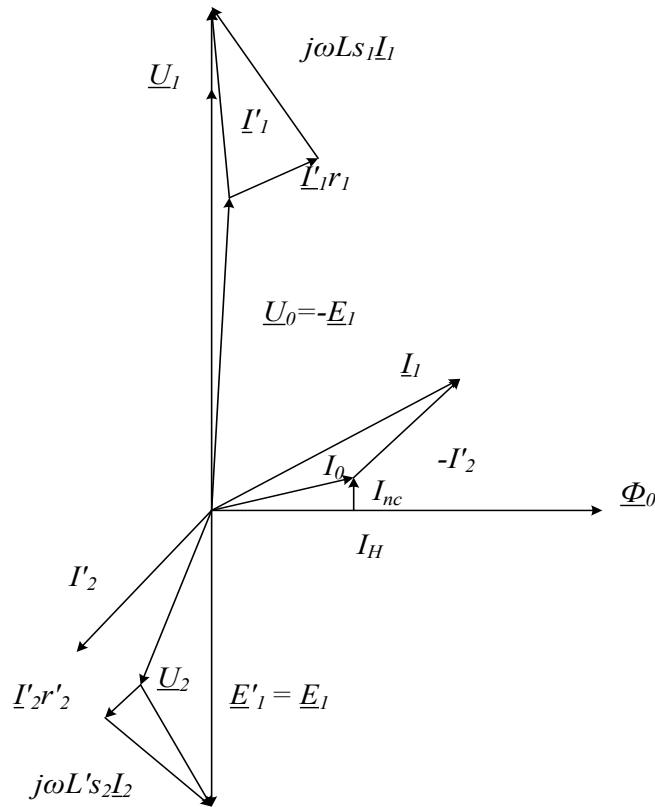


Рисунок 20.3

Дослід короткого замикання

В цьому режимі струми обмоток мають номінальні значення, а вхідна напруга $U_1 = U_{1k}$ становить приблизно 3–18% U_{1H} та називається напругою короткого замикання трансформатора. Оскільки вторинні клєми замкнені накоротко, то струм у колі (рис. 20.2) проходить, в основному, шляхом $r_1 \rightarrow L_{S1} \rightarrow L'_{S2} \rightarrow r'_2$, тому струмом I_0 можна знехтувати порівняно із струмом К.З. I_K : внаслідок цього можна вважати, що $I_{1K} = I'_{2H}$. Якщо виміряти в цьому режимі U_{1k} , I_{1k} , P_{1k} , то можна визначити еквівалентні активні та реактивні опори:

$$r_e = \frac{P_{1k}}{I_{1k}}; \quad Z_e = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; \quad X_e = \sqrt{Z_e^2 - r_e^2}, \text{ де}$$

$$r_e = r_1 + r'_2; \quad x_e = \omega L_{S1} + \omega L'_{S2}.$$

Для приведеного трансформатора можна вважати, що $r_1 = r'_2$ і $\omega L_{S1} = \omega L'_{S2}$.

Тому $r_1 = r'_2 = \frac{r_e}{2}$, $\omega L_{S1} = \omega L'_{S2} = \frac{x_e}{2}$.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему згідно з рис. 20.4. Як досліджуваний трансформатор взяти на лабораторному стенді трифазний трансформатор і використати дві його обмотки (за вказівкою викладача).

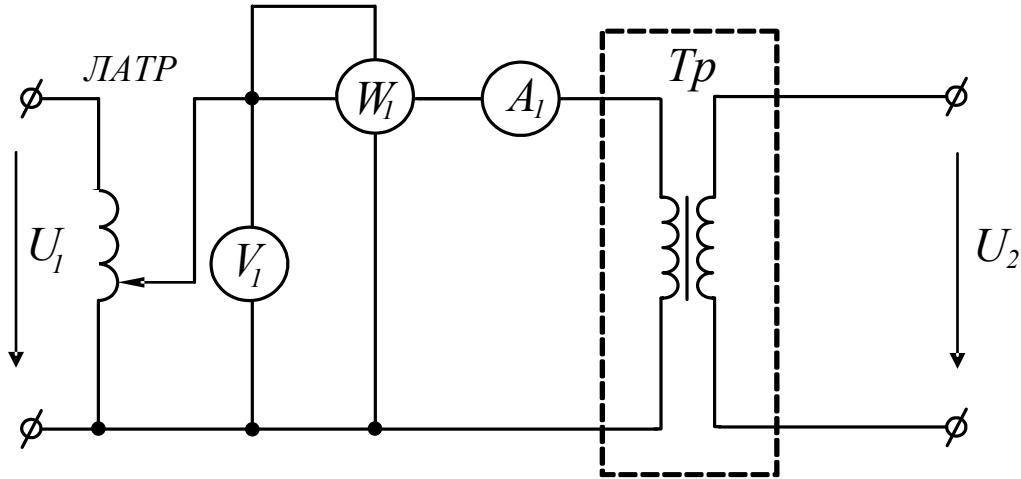


Рисунок 20.4

2. Виконати дослід Х.Х. трансформатора. Для вимірювання напруги U_2 приєднати вольметр на 7,5 – 60 В. На первинні клеми подати номінальну напругу $U = 220$ В. Результати вимірювань занести до табл. 20.1.

Таблиця 20.1

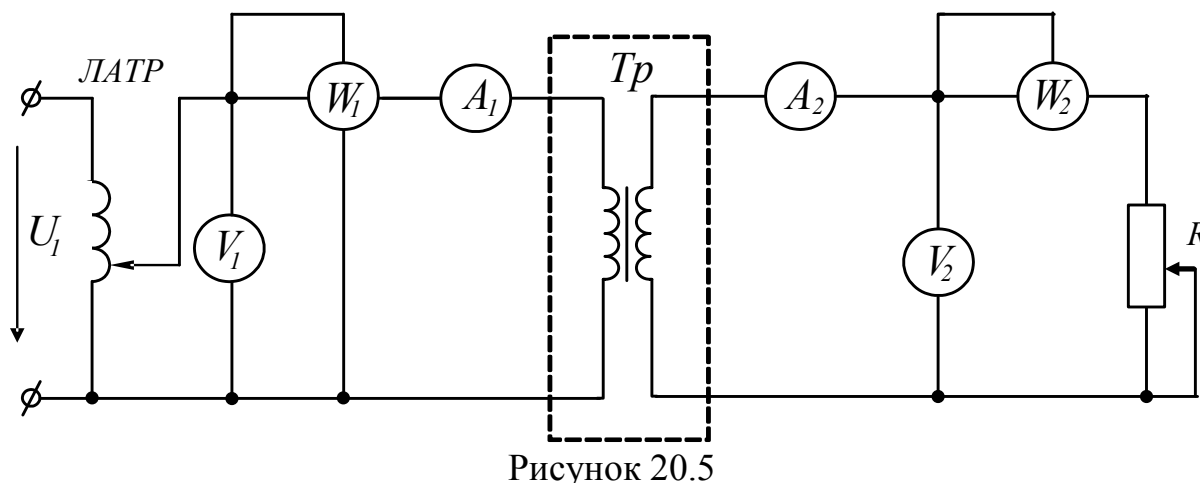
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2
	В	А	Вт	В	А	Вт
Холостий хід						
Коротке замикання						
Режим навантаження						

3. Замість вольметра приєднати до вторинних клем амперметр на 5 А. Виконати дослід короткого замикання. Перед вмиканням кола під напругу ручка ЛАТРа має знаходитись на 0.

Ввімкнути напругу, повільно підвищувати її ЛАТРОм до моменту, коли у вторинній обмотці встановиться струм I_{2H} . При цьому в первинній обмотці напруга буде U_{1k} . Зняти покази приладів і занести до табл. 20.1.

4. Скласти схему рис. 20.5 для виконання режиму навантаження. Перед початком дослідів опір реостата має бути максимальним. Ввімкнути напругу, і з допомогою ЛАТРа подати номінальну напругу $U_{1H} = 220$ В на

первинну обмотку трансформатора. Далі зменшити опір реостата і встановити у вторинній обмотці струм, значення якого вказане викладачем (3–5 А). Покази приладів занести до табл. 20.1.



Обробка результатів дослідів

1. За даними дослідів пунктів 2, 3 обчислити всі параметри схеми заміщення трансформатора.
2. Для кожного з трьох режимів роботи трансформатора побудувати в масштабі його векторну діаграму.
3. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Пояснити будову та принцип дії трансформатора з сердечником.
2. Чому магнітні потоки розсіювання Φ_{S1} і Φ_{S2} пов'язані із струмами в обмотках лінійною залежністю, а основний потік Φ_0 – нелінійною?
3. Написати рівняння трансформатора і пояснити суть кожної його складової.
4. Як сильно змінюється основний магнітний потік Φ_0 при зміні струму у вторинній обмотці трансформатора в широких межах? Чому?
5. Чим відрізняється приведений трансформатор від неприведеного?
6. В якій частині трансформатора, в основному, проходять втрати енергії в режимі холостого ходу?
7. Пояснити методику визначення параметрів схеми заміщення трансформатора.
8. Пояснити процес побудови векторних діаграм для дослідження режимів роботи трансформатора.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 21WB

ДОСЛІДЖЕННЯ НАЙПРОСТІШИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

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

Теоретичні відомості

Електрофізичні властивості напівпровідників

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

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

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

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

Під дією зовнішніх чинників деякі валентні електрони атомів кристалічних ґраток набувають енергії, достатньої для звільнення від ковалентних зв'язків. Так, при будь-яких температурах вище абсолютного нуля атоми твердого тіла коливаються біля вузлів кристалічних ґраток. Чим вища температура, тим більша амплітуда коливань. Час від часу енергія цих

коливань, окремі флуктуації якої можуть перевищувати її середнє значення, передаються якомусь електрону, у результаті чого його повна енергія є достатньою для переходу з валентної зони в зону провідності.

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

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

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

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

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

Істотно змінює провідність напівпровідника наявність домішок.

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

Провідність, викликана наявністю в кристалі напівпровідника домішок з атомів з іншою валентністю, називається *домішковою*. Домішки, що викликають у напівпровіднику збільшення вільних електронів,

називаються *донорними*, а ті що викликають збільшення дірок – *акцепторними*.

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

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

Однорідні напівпровідники знаходять обмежене застосування: вони безпосередньо використовуються лише як напівпровідникові резистори. Більшість дискретних напівпровідникових приладів і елементів мікросхем являють собою неоднорідні структури. Основні різновиди таких структур – контакт двох напівпровідників із різним типом провідності *n*- і *p*-типу і контакт металу з напівпровідником.

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

Електричний перехід між двома областями напівпровідника з різними видами провідності називають електронно-дірковим або p-n переходом (рис. 21.1).

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

Внаслідок того, що концентрація електронів у *n*-області вища, ніж у *p*-області, а концентрація дірок у *p*-області вища, ніж у *n*-області, на межі

цих областей існує градієнт концентрацій носіїв, що викликає дифузійний струм електронів із *n*-області в *p*-область і дифузійний струм дірок із *p*-області в *n*-область.

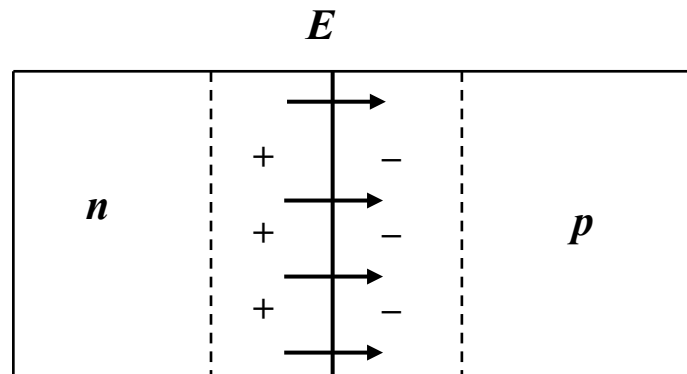


Рисунок 21.1

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

Просторові заряди в переході утворюють електричне поле, спрямоване від позитивно заряджених іонів донорів до негативно заряджених іонів акцепторів. Схема утворення електричного поля в *p-n* переході показана на рис. 21.1. Це поле є гальмуючим для основних носіїв заряду й прискорюючим для неосновних.

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

Спочатку розглянемо випадок, коли зовнішня напруга протилежна за знаком контактній різниці потенціалів (рис. 21.2). У цьому випадку джерело включається так, що поле, утворюване зовнішньою напругою, спрямоване назустріч власному полю *p-n*-переходу. Таке вмикання називають *прямим*. Воно приводить до зниження висоти потенційного бар'єра. Основні носії заряду одержують можливість наблизитися до контакту, ширина *p-n*-переходу зменшується.

Частина основних носіїв, що мають найбільші значення енергії, зможе подолати потенційний бар'єр і перейти через межу, що розділяє напівпровідники *n*- і *p*-типу. При цьому дифузійна складового струму стає більшою за дрейфову і результуючий прямий струм через перехід стає відмінним від нуля:

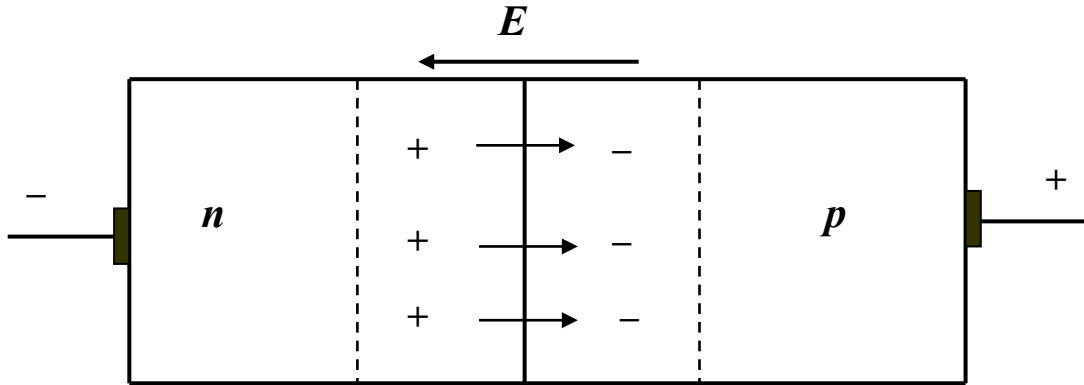


Рисунок 21.2

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

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

Розглянемо тепер властивості *p-n* переходу, до якого підведено обернену зовнішню напругу. При цьому електричне поле, утворюване джерелом, збігається з полем *p-n*-переходу. Потенційний бар'єр між *p*- і *n*-областями зростає. Кількість основних носіїв, що спроможні перебороти дію результуючого поля, зменшується. Відповідно зменшується і струм дифузії основних носіїв заряду. Під дією електричного поля, утворюваного зовнішнім джерелом, основні носії будуть відтягатися від приконтатних прошарків у глиб напівпровідника. У результаті ширина *p-n* переходу збільшується.

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

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

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

Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковим діодом називається прилад із двома затискачами, що містить один **p-n**-перехід (*p-n junction*).

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

Залежно від засобу одержання **p-n**-переходів напівпровідникові діоди поділяються на два типи: *площинні і точкові*.

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

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

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

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

Імпульсні діоди призначені для роботи у швидкодійних імпульсних схемах із часом переключення 1 мкс і менше. При настільки коротких робочих імпульсах слід враховувати інерційність процесів вмикання і вимикання діодів та вживати відповідні конструктивно-технологічні заходи.

Варикапами називають напівпровідникові діоди, в яких використовується бар'єрна ємність замкненого **p-n**-переходу, що залежить від величини прикладеної до діода оберненої напруги. При зростанні напруги ширина **p-n**-переходу збільшується, а його бар'єрна ємність зменшується. Основне застосування варикапів – електронне настроювання коливальних контурів.

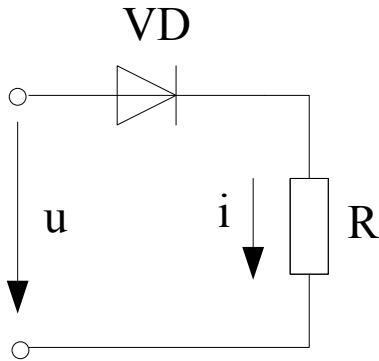
Тунельним називається напівпровідниковий діод, в характеристиці якого є область від'ємного диференціального опору. Завдяки цьому тунельний діод можна розглядати як прилад із двома стійкими станами, тобто електронний ключ. Перехід із одного стійкого стану в інший відбувається дуже швидко, через що тунельні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

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

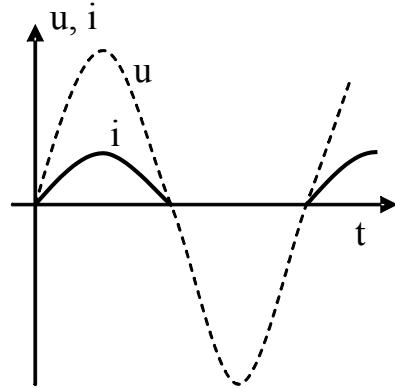
Світлодіодом називають випромінюючий напівпровідниковий прилад з одним *p-n*-переходом, призначений для безпосереднього перетворення електричної енергії в енергію некогерентного світлового випромінювання. При подачі на *p-n*-перехід прямої напруги спостерігається інтенсивна інжекція неосновних носіїв заряду: електронів у *p*-область і дірок у *n*-область. Інжектвані неосновні носії рекомбінують з основними носіями цієї області напівпровідника; при цьому виділяється енергія. У багатьох напівпровідників рекомбінація носить безвипромінювальний характер – енергія, що виділяється при рекомбінації, віддається кристалічним ґраткам, тобто перетворюється зрештою на тепло. Проте в напівпровідників, виконаних на основі карбїду кремнію, галію, миш'яку та деяких інших матеріалів, рекомбінація є випромінювальною – енергія рекомбінації виділяється у вигляді *фотонів*. Тому у таких напівпровідників проходження через *p-n*-перехід струму в прямому напрямку супроводжується некогерентним оптичним випромінюванням певного спектрального складу. Це явище використовується для створення *світлодіодів*, їх іноді називають також *люмінесцентними діодами*. Залежно від ширини забороненої зони напівпровідника й особливостей рекомбінації носіїв заряду випромінювання може лежати в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах спектра. Найбільшого поширення набули світлодіоди, що випромінюють жовте, червоне і зелене світло.

Випрямлячі

Випрямлячем називається пристрій, який перетворює змінний струм на постійний. Найпростіший складається із послідовного з'єднання діода і опору навантаження (рис. 21.3, а).



а)



б)

Рисунок 21.3

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

У від'ємний півперіод діод закритий, його опір нескінченний, струму в колі немає (рис. 21.3, б).

Таким чином

$$i = \begin{cases} I_m \sin \omega t, & kT < t < \frac{2k+1}{2}T. \\ 0, & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T. \end{cases} \quad (21.1)$$

Визначимо величину постійної складової струму, який протікає через навантаження

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{\pi}. \quad (21.2)$$

Діюче значення струму навантаження

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{2}. \quad (21.3)$$

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

$$P_0 = I_0^2 r_H$$

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

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

В випрямлячі з ідеальним діодом

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

Кращий коефіцієнт ефективності має мостовий випрямляч, який показаний на рис. 21.4, а.

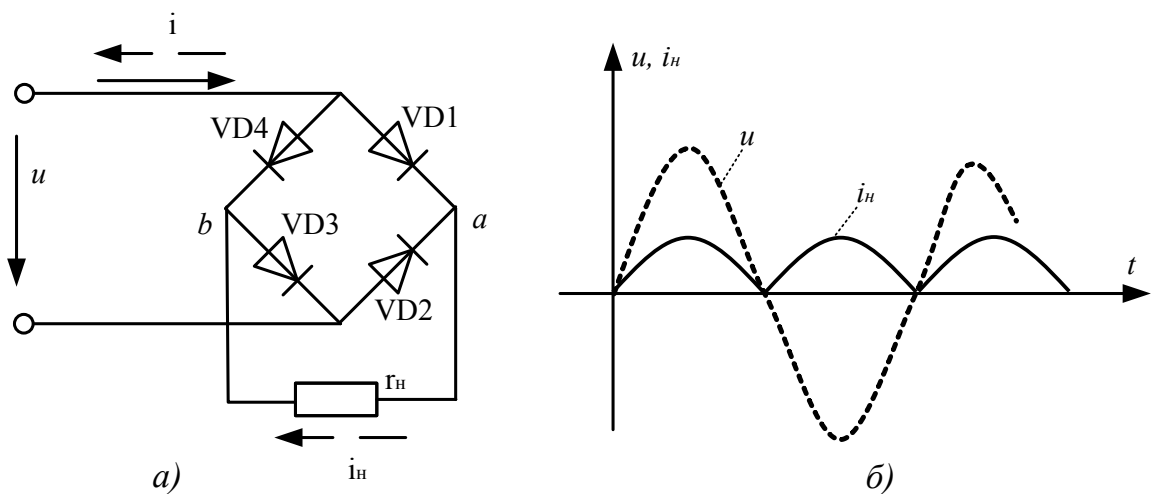


Рисунок 21.4

В додатний півперіод прикладеної напруги струм проходить через діод 1, навантаження, діод 3, а у від'ємний півперіод – через діод 2, навантаження, діод 4. Струм в навантаженні в обидва півперіоди направлений в одну і ту ж сторону, від точки *a* до точки *b* (рис. 21.4) і тому:

$$i_n = \begin{cases} I_m \sin \omega t & kT < t < \frac{2k+1}{2}T. \\ -I_m \sin \omega t & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T. \end{cases} \quad (21.4)$$

Постійна складова струму навантаження

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{2I_m}{\pi}. \quad (21.5)$$

Діюче значення струму навантаження

$$I_n = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (21.6)$$

Ефективність випрямлення

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

Підготовка до роботи

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

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

3. Пояснити роль ємнісного фільтра у збільшенні ефективності випрямлення.

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

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему (рис. 21.5).
2. Змінюючи напругу на вході кола з 0,5 В до 1,5 В, зняти пряму вітку ВАХ діода. Потім, помінявши місцями затискачі діода, зняти

зворотну вітку ВАХ діода (напругу на вході кола в цьому випадку визначити самостійно). Результати вимірювань занести до таблиці 21.1.

1N3

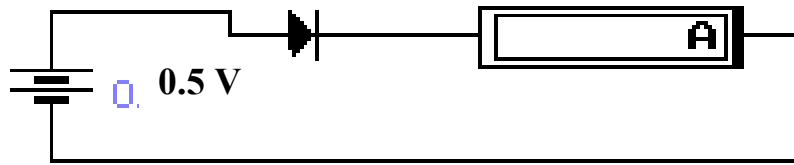


Рисунок 21.5

Таблиця 21.1

Uпр.								
Iпр.								
Uзвор.								
Iзвор.								

3. Скласти схему однопівперіодного випрямлення (рис. 21.6).

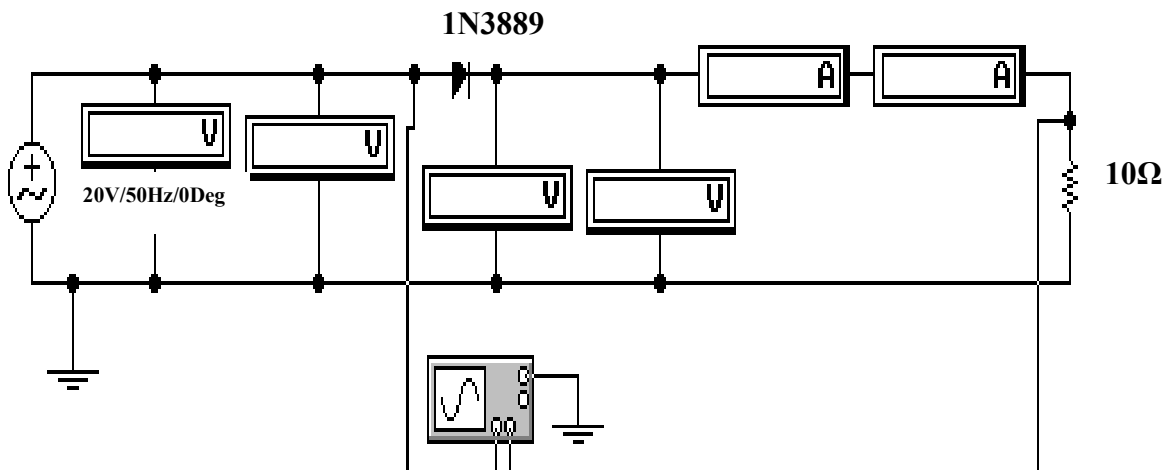


Рисунок 21.6

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

4. Зняти та записати в таблицю 21.2 покази приладів.

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

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

Таблиця 21.2

$U_{ВХ}$	$U_{ВХО}$	$U_{Н}$	$U_{НО}$	$I_{Н}$	$I_{НО}$

де $U_{ВХ}$, $U_{ВХО}$ – діюче значення напруги на вході кола та її постійна складова;

$U_{Н}$, $U_{НО}$ – відповідні напруги на опорі навантаження;

$I_{Н}$, $I_{НО}$ – відповідні струми через опір навантаження.

5. Роздрукувати осцилограми напруг на вході та на навантаженні.

6. Увімкнувши паралельно навантаженню ємність C_{ϕ} (див. рис. 21.7), в'яснити, як зміниться постійна складова струму через навантаження. Підібрати величину ємності C_{ϕ} такою, щоб постійна складова струму в опорі навантаження $I_{НО}$ змінилась приблизно в два рази порівняно із його значенням в п. 4. Записати це значення ємності C_{ϕ} .

7.

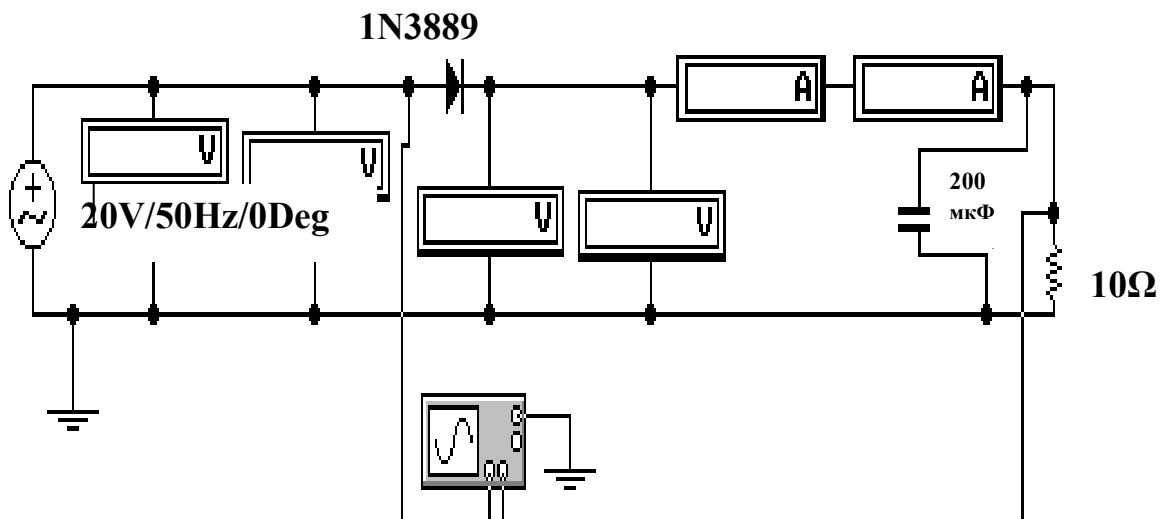


Рисунок 21.7

8. Скласти схему двопівперіодного випрямлення (рис. 21.8, 21.9).

9. Зняти та записати в таблицю 21.3 покази приладів.

Таблиця 21.3

$U_{ВХ}$	$U_{ВХО}$	$U_{Н}$	$U_{НО}$	$I_{ВХ}$	$I_{ВХО}$	$I_{Н}$	$I_{НО}$

$U_{ВХ}$, $U_{ВХО}$ – дійсне значення напруги на вході кола та її постійна складова;

$U_{Н}$, $U_{НО}$ – відповідні напруги на опорі навантаження;

$I_{ВХ}$, $I_{ВХО}$ – дійсне значення струму на вході кола та його постійна складова;

$I_{Н}$, $I_{НО}$ – відповідні струми через опір навантаження.

Обробка результатів дослідів

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

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

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

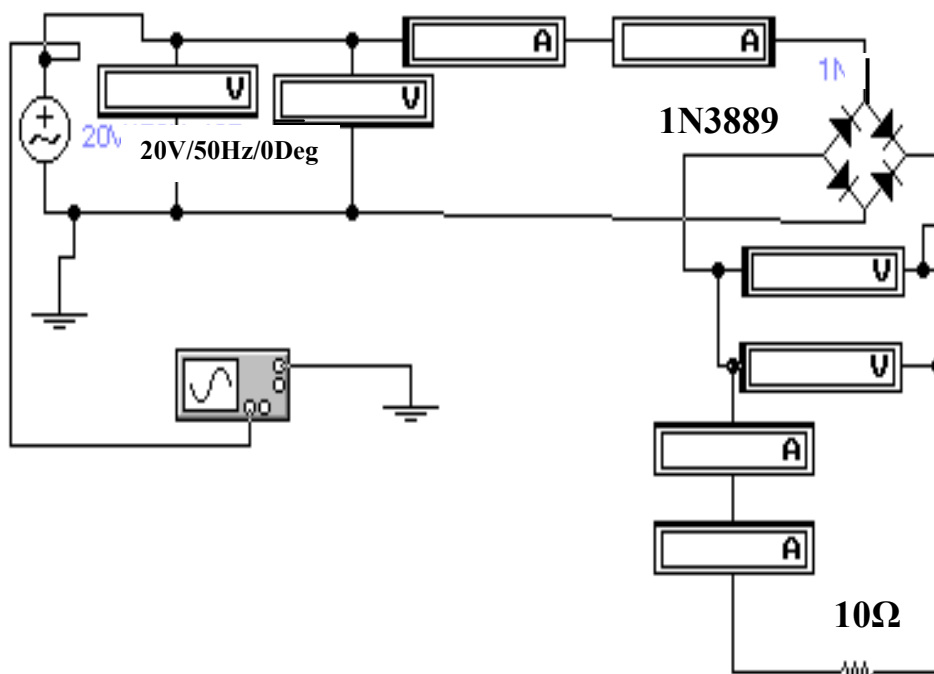


Рисунок 21.8

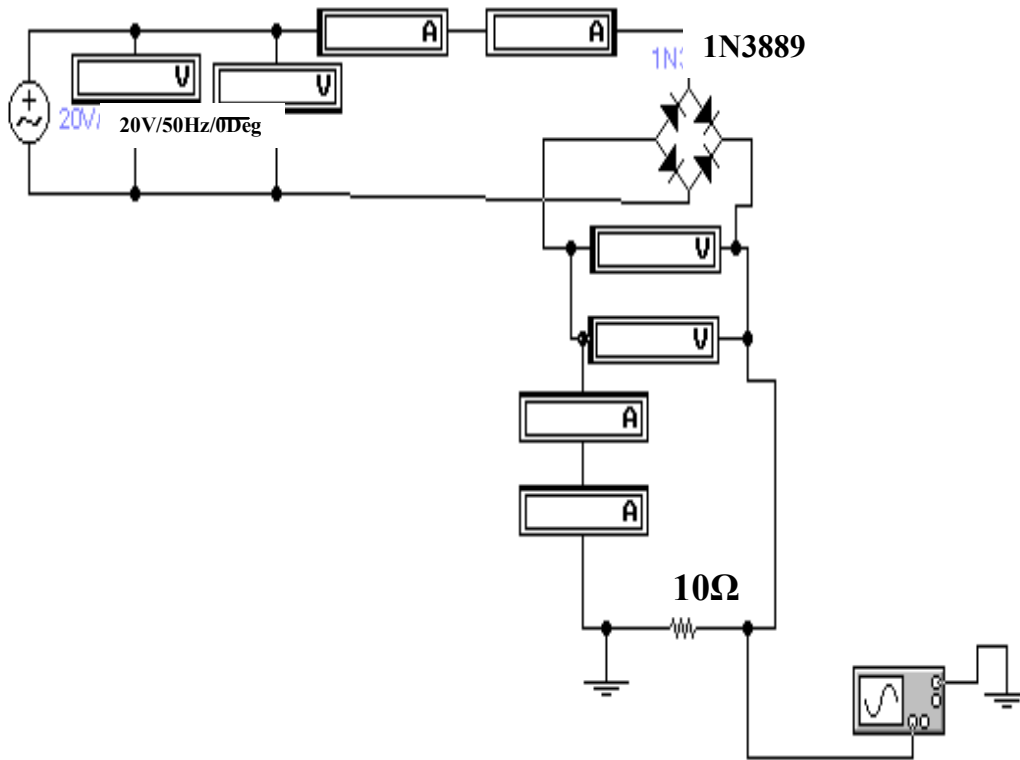


Рисунок 21.9

4. За даними вимірювань визначити коефіцієнти ефективності випрямлення K_e .

Контрольні запитання.

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

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 22

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОРІДНОЇ ДОВГОЇ ЛІНІЇ

Мета роботи: експериментально дослідити *хвильові процеси (wave process)* в лінії з розподіленими параметрами в сталих синусоїдних режимах.

В роботі необхідно дослідити розподілення напруги в двопровідній лінії за допомогою чвертьхвильового вольтметра в режимах холостого ходу, короткого замикання і активного навантаження, вирахувати первинні і вторинні параметри лінії.

Теоретичні відомості

Довгою лінією (*range line*) з розподіленими параметрами називають коло, яке створене двома провідниками довжиною ℓ , якщо вона співмірна з довжиною електромагнітної хвилі (*wave length*) λ . Будь-яку нескінченно малу ділянку лінії можна характеризувати певними нескінченно малими ємністю, індуктивністю і активним опором, тобто електричні параметри такої лінії можна вважати неперервно розподіленими по її довжині. На рис. 22.1 відображена еквівалентна схема нескінченно малої ділянки лінії dx .

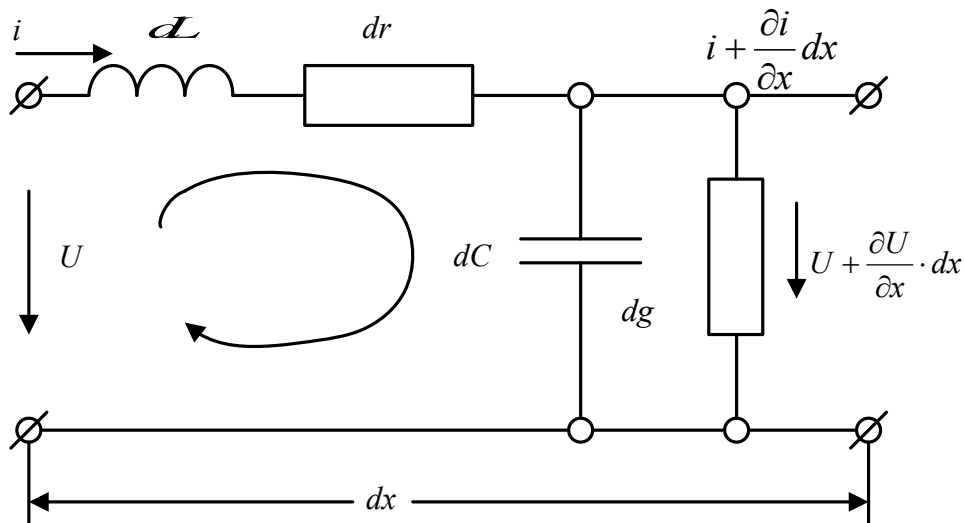


Рисунок 22.1

На цій схемі:

dL – підсумкова індуктивність верхнього і нижнього проводів;

dC – ємність між провідниками;

dr – активний опір обох провідників;
 dg – провідність ізоляції між провідниками.

Практично для характеристики лінії використовують так звані погонні параметри лінії тобто параметри її одиниці довжини:

$L_0 = \frac{dL}{dx}$ – погонна індуктивність; $C_0 = \frac{dC}{dx}$ – погонна ємність;

$r_0 = \frac{dr}{dx}$ – погонний активний опір; $g_0 = \frac{dg}{dx}$ – погонна провідність ізоляції.

Якщо значення L_0, C_0, r_0, g_0 не змінюється по довжині лінії, таку лінію називають однорідною.

Відповідно I і II законів Кірхгофа для нескінченно малої ділянки лінії dx , відображеної еквівалентною схемою рис. 22.1, можна одержати систему диференціальних рівнянь довгої лінії:

$$\begin{cases} -\frac{\partial U}{\partial x} = r_0 \cdot i + L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t}, \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 \cdot U + C_0 \cdot \frac{\partial U}{\partial t}. \end{cases} \quad (22.1)$$

Ці рівняння справедливі як для сталого, так і перехідного режимів лінії. При певних початкових і граничних умовах (*boundary conditions*) можна визначити струм і напругу як функцію часу і відстані від початку (або кінця) лінії.

Для усталеного синусоїдного режиму лінії розв'язок системи диференціальних рівнянь довгої лінії (22.1) в символічній формі буде мати вигляд:

$$\underline{U} = \frac{1}{2} \cdot \left(\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{z}_c \right) \cdot e^{-\gamma x} + \frac{1}{2} \cdot \left(\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \cdot \underline{z}_c \right) \cdot e^{\gamma x}, \quad (22.2)$$

$$\underline{I} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{z}_c} + \underline{I}_1 \right) \cdot e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{z}_c} - \underline{I}_1 \right) \cdot e^{\gamma x}, \quad (22.3)$$

де $\underline{U}; \underline{I}$ – комплекси напруги і струму у деякій точці лінії, що знаходиться на відстані X від початку лінії;

$\underline{U}_1; \underline{I}_1$ – комплекси напруги і струму на початку лінії;

$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$ – стала передачі лінії при заданій частоті;

α – коефіцієнт затухання амплітуди коливання;

β – коефіцієнт зміни фази коливання;

$\underline{z}_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} = z_c \cdot e^{j\phi_c}$. – комплексний хвильовий опір довгої лінії при заданій частоті.

Позначимо:

$$\frac{1}{2}(\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{z}_c) = \underline{U}_\phi = U_\phi \cdot e^{j\phi}, \quad (22.4)$$

$$\frac{1}{2}(\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \cdot \underline{z}_c) = \underline{U}_\psi = U_\psi \cdot e^{j\psi}. \quad (22.5)$$

Одержимо миттєві значення напруги і струму для деякої точки лінії:

$$U = \sqrt{2} \cdot U_\phi \cdot e^{-\alpha x} \cdot \text{Sin}(\omega t - \beta x + \phi) + \sqrt{2} \cdot U_\psi \cdot e^{\alpha x} \cdot \text{Sin}(\omega t + \beta x + \psi) = U_n + U_0, \quad (22.6)$$

$$i = \sqrt{2} \cdot \frac{U_\phi}{z_c} \cdot e^{-\alpha x} \cdot \text{Sin}(\omega t - \beta x + \phi - \phi_c) - \frac{\sqrt{2} \cdot U_\psi}{z_c} \cdot e^{\alpha x} \cdot \text{Sin}(\omega t + \beta x + \psi - \phi_c) = i_n - i_0. \quad (22.7)$$

В кожній із складових правої частини двох останніх рівнянь аргумент синуса залежить від часу t і від просторової координати x , кожна з цих складових можна розглядати як рівняння біжучої хвилі вздовж лінії. Амплітуда хвилі залежить від просторової координати x і згасає в напрямку її руху. Хвилі напруги і струму, до аргументу яких входить x із знаком «мінус», рухаються від початку лінії до кінця і називаються хвилями, що падають (або прямими) – u_n , i_n , а хвилі, до аргументу котрих входить x зі знаком плюс, рухаються від кінця лінії до початку і називаються відбитими (або оберненими) – U_0 , i_0 . Коефіцієнт згасання α характеризує зміну амплітуди прямої (або оберненої) хвилі на одиницю довжини лінії, а коефіцієнт фази β характеризує зміну фази хвилі на одиницю довжини лінії. Кут ϕ_c характеризує зсув фаз між напругою і струмом прямої (або оберненої) хвилі в будь-якій точці лінії.

Фазовою швидкістю називається швидкість зміщення вздовж лінії деякої точки, в котрій фаза коливання (напруги або струму) залишається незмінною, тобто:

$$u = \frac{\omega}{\beta}. \quad (22.8)$$

Довжиною хвилі називається відстань, яка береться між найближчими двома точками в напрямку поширення прямої (або оберненої) хвилі, фази коливання в котрих однакові, тобто аргументи синусоїдної напруги (або струму) в котрих відрізняються на 2π :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega} \cdot u = \frac{u}{f} = U \cdot T. \quad (22.9)$$

Тобто довжина хвилі – це відстань, яку пробігає хвиля за проміжок часу, що дорівнює періоду коливання.

Фізично у будь-якій точці лінії існує лише один струм і одна напруга; розклад цих дійсних струмів і напруг на прямі та обернені хвилі є лише зручним способом, який полегшує розрахунки і аналіз електромагнітних процесів в лінії.

Щоб потужність, яка передається по лінії від джерела до приймача, була максимальною, потрібно створити такі умови, при котрих відбиті в лінії хвилі не виникали. Аналізуючи вирази (22.2) та (22.3), при заданих напрузі і струмі в кінці \underline{U}_2 і \underline{I}_2 можна довести, що відбиті хвилі будуть відсутні, коли:

$$\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \cdot \underline{z}_c = 0 \quad \text{або} \quad \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} - \underline{z}_c = 0, \quad \text{звідки} \quad \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \underline{z}_c = \underline{z}_2.$$

Таким чином, відбиті хвилі не виникають, коли комплексний опір навантаження лінії дорівнює хвильовому опору лінії при заданій частоті:

$$\underline{z}_2 = \underline{z}_c. \quad (22.10)$$

Такий опір навантаження і сам режим роботи лінії називають узгодженими (режим без відбиття). Рівняння лінії в узгодженому режимі будуть мати вигляд:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}x}, \quad \underline{I} = \underline{I}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}x}. \quad (22.11)$$

Лінія без втрат

Лінію, в якій відсутні втрати енергії (тобто, коли $r_0 = 0$, $g_0 = 0$), називають ще ідеальною лінією або лінією без втрат. При наближених розрахунках ідеальною можна вважати лінію, коли $r_0 \ll \omega L_0$ і $g_0 \ll \omega L_0$, (тобто короткі високочастотні лінії).

Рівняння ідеальної лінії найзручніше одержати з рівнянь реальної лінії, записаних з використанням гіперболічних функцій, при відліку X від кінця лінії:

$$\begin{cases} \underline{U} = \underline{U}_2 \cdot \text{ch}\underline{\gamma}x + \underline{I}_2 \cdot \underline{z}_c \text{ch}\underline{\gamma}x, \\ \underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{z}_c} \cdot \text{ch}\underline{\gamma}x + \underline{I}_2 \cdot \text{ch}\underline{\gamma}x. \end{cases} \quad (22.12)$$

Для ідеальної лінії $\underline{\gamma} = j\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} = j\beta$, тобто $\alpha = 0$, таким чином амплітуди напруги і струму при русі хвилі вздовж лінії не згасають.

Хвильовий опір ідеальної буде мати вигляд:

$$\underline{z}_c = \sqrt{L_0 \cdot G_0} = z_c, \quad (22.13)$$

тобто є дійсним числом, звідки струм і напруга прямої (і оберненої) хвилі збігаються по фазі.

Рівняння ідеальної лінії значно спрощуються, їх можна записати вже через синусоїдні функції:

$$\begin{cases} \underline{U} = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta x + j \underline{I}_2 z_c \cdot \sin \beta x, \\ \underline{I} = \underline{I}_2 \cdot \cos \beta x + j \underline{U}_2 \frac{1}{z_c} \cdot \sin \beta x. \end{cases} \quad (22.14)$$

Розглянемо узгоджений режим ідеальної лінії. Для цього ввімкнемо на кінці лінії активний опір, який дорівнює хвильовому опору, тоді рівняння лінії будуть мати вигляд:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cdot e^{-j\beta x}, \quad \underline{I} = \underline{I}_2 \cdot e^{-j\beta x}, \quad (22.15)$$

де $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot z_c$.

Таким чином, в лінії будуть наявні тільки прямі біжучі хвилі напруги і струму, які будуть збігатися по фазі у будь-якій точці лінії.

Коефіцієнт корисної дії лінії в цьому режимі буде дорівнювати 100%, тобто вся енергія від джерела буде переміщуватись у прямому напрямку до приймача і повністю в ньому поглинатися.

Можна створити такі умови, при яких енергія вздовж лінії не буде переміщуватись і надходити до приймача. Для цього потрібно замкнути приймач або відключити його, або включити чисто реактивний приймач. Режим лінії в кожному з цих трьох випадків називають режимом стоячих хвиль. Коливання енергії відбувається між електричним і магнітним полями лінії на кожній ділянці кола, яка дорівнює чверті довжини хвилі, а максимальний запас енергії в магнітному полі дорівнює максимальному запасу енергії в електричному полі цього відрізка лінії. Аналогічні явища відбуваються при резонансі у ідеальному коливальному контурі. Таким чином, можна вважати, що стоячі хвилі виникають як результат накладання двох зустрічних біжучих хвиль з однаковими амплітудами.

Характерним для режиму стоячих хвиль є наявність в лінії: вузлів хвиль, тобто точок, в яких коливання напруги або струму відсутні; пучностей хвиль, тобто точок, в яких коливання напруги і струму лінії відбуваються з максимальними амплітудами, які дорівнюють $\sqrt{2}U_1$ і $\sqrt{2}I_1$, відповідно.

Найближчий вузол хвилі струму знаходиться від найближчого вузла напруги на відстані, яка дорівнює чверті довжини хвилі і навпаки. Напруга і струм в будь-якій точці лінії в режимі стоячих хвиль зсунуті по фазі на 90° .

Хай лінія без втрат замкнута на реактивний опір. З рівнянь (22.14) при $\underline{U}_2 = jx_2 \cdot \underline{I}_2$ будемо мати:

$$\begin{cases} \underline{U} = \underline{U}_2 \left(\cos \beta x + \frac{z_c}{x_2} \cdot \sin \beta x \right), \\ \underline{I} = \underline{I}_2 \left(\cos \beta x + \frac{x_2}{z_c} \cdot \sin \beta x \right). \end{cases} \quad (22.16)$$

Або в іншій формі запису

$$\begin{cases} \underline{U} = \underline{U}_2 \sqrt{1 + \left(\frac{z_c}{x_2} \right)^2} \cdot \cos(\beta x - \phi), \\ \underline{I} = -\underline{I}_2 \sqrt{1 + \left(\frac{x_2}{z_c} \right)^2} \cdot \sin(\beta x - \phi), \end{cases} \quad (22.17)$$

де $\phi = \arctg \frac{z_c}{x_2}$.

Амплітуда напруги і струму в різних точках лінії будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} U_m = \sqrt{2} \cdot U_2 \sqrt{1 + \left(\frac{z_c}{x_2} \right)^2} \cdot \cos(\beta x - \phi), \\ I_m = \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{x_2}{z_c} \right)^2} \cdot \sin(\beta x - \phi). \end{cases} \quad (22.18)$$

Звідси випливає, що вузли напруги будуть знаходитись в точках, де функція $\cos(\beta x - \phi) = 0$, тобто:

$$\beta x_m = (2m+1) \frac{\pi}{2} + \phi, \quad x_m = (2m+1) \frac{\lambda}{4} + \frac{\phi}{2}, \quad (22.20)$$

де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Для лінії з малими втратами $\omega \cdot L_0 \gg r_0$, $\omega \cdot C_0 \gg g_0$, в такому разі:

$$\underline{z}_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (22.21)$$

Коефіцієнт поширення хвилі:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0) \cdot (g_0 + j\omega C_0)} = j\omega \sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot \sqrt{1 - j \frac{r_0}{\omega L_0}} \cdot \sqrt{1 - j \frac{g_0}{\omega C_0}}. \quad (22.22)$$

Використовуючи розклад $\sqrt{1 + \Delta} = 1 + \frac{\Delta}{2} - \frac{\Delta^2}{4} \dots$, при $\Delta \ll 1$ будемо мати:

$$\sqrt{1 - j \frac{r_0}{\omega L_0}} \approx 1 - j \frac{r_0}{2\omega L_0}, \quad (22.23)$$

$$\sqrt{1 - j \frac{g_0}{\omega C_0}} \approx 1 - j \frac{g_0}{2\omega C_0}. \quad (22.24)$$

Підставляючи (22.23) і (22.24) і нехтуючи членами другого порядку малості, отримаємо:

$$\underline{\gamma} \approx \frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{g_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} + j\omega \sqrt{L_0 \cdot C_0} \quad (22.25)$$

Звідки $\alpha \approx \frac{r_0}{2z_c} + \frac{g_0}{2} z_c$; $\beta \approx \omega \sqrt{L_0 C_0}$; $U = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$.

Якщо провідність ізоляції дуже мала, то:

$$\alpha = \frac{r_0}{2z_c}. \quad (22.26)$$

Погонні параметри лінії за умови, що відстань між проводами D набагато більша радіуса провідника a :

$$r_0 = \frac{1}{\pi a} \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\gamma}}, \quad L_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \frac{D}{a}, \quad C_0 = \frac{\pi \varepsilon_0}{\ln \frac{D}{a}}, \quad (22.27)$$

$$z_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \ln \frac{D}{a} = 2761 \ln \frac{D}{a},$$

де γ – питома провідність провідів;

μ – магнітна проникність проводів.

Якщо лінія виконана з мідних проводів, то вирази для r_0 та α можна записати в спрощеному вигляді:

$$r_0 \approx \frac{8,3\sqrt{f}}{a} \cdot 10^{-8} ; \alpha \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\sqrt{f}}{a \ln \frac{D}{a}},$$

де f – вимірюється в герцах; a – в сантиметрах.

Порядок виконання роботи

1. Включити генератор в схемі (рис.22.2) і з допомогою вимірювальної четвертьхвильової лінії зняти криву розподілення напруги вздовж довгої лінії в режимах: холостого ходу, короткого замикання, активного навантаження $z_2 = 470$ Ом; $\ell = 530$ см, $D = 7$ см, $a = 0,2$ см.

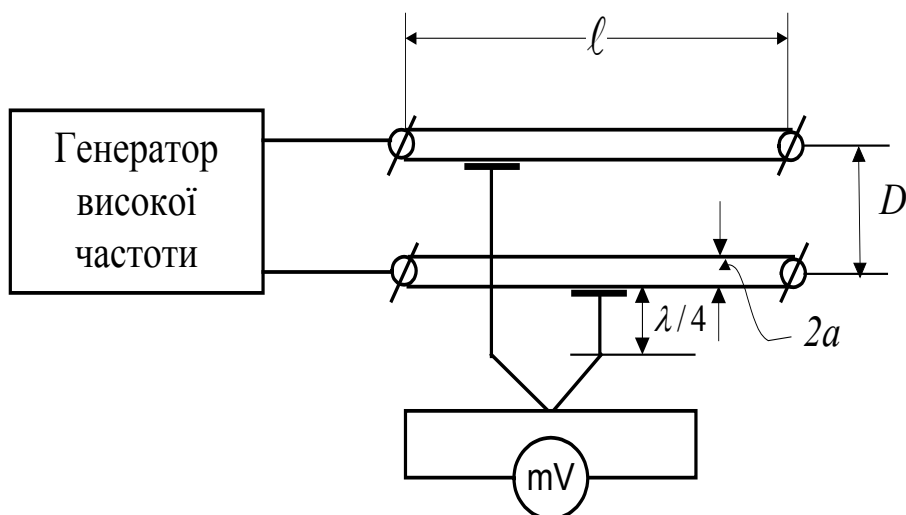


Рисунок 22.2

Примітка. Виміри необхідно проводити не більше, ніж через 10 см, фіксуючи при цьому найточніше положення вузлів і пучностей напруги. Всі виміри потрібно починати від кінця лінії. Під час вимірювання потрібно слідкувати, щоб вимірювальна лінія була розташована під прямим кутом до дослідженої лінії.

Результати вимірювань звести в табл. 22.1.

Таблиця 22.1

Відстань від початку лінії, (см)	5,0	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	...	0,1	0
Х.Х.												
К.З.												
Активне навантаження												

Обробка результатів дослідів

1. За геометричними вимірами двопровідної лінії потрібно обчислити її первинні параметри: L_0, C_0, r_0 .
2. Обчислити хвильовий опір лінії Z_c , сталу передачі $\underline{\gamma}$, коефіцієнт згасання α і зміну фази β , при цьому потрібно врахувати, що $r_0 \ll \omega L_0$ і $g_0 = 0$.
3. За даними дослідів потрібно побудувати графік розподілення напруги вздовж лінії для кожного з режимів.
4. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які кола називаються колами з розподіленими параметрами?
2. Які величини відносяться до первинних параметрів довгих ліній? Який фізичний зміст цих параметрів?
3. Наведіть рівняння, що описують процеси в колах з розподіленими параметрами.
4. Які величини відносяться до вторинних параметрів довгих ліній? Який фізичний зміст цих параметрів? Наведіть зв'язок між первинними та вторинними параметрами.
5. Що являють собою падаючі та відбиті хвилі напруги та струму?
6. В якому випадку в лінії відсутні відбиті хвилі?
7. Які лінії можна вважати лініями без втрат?
8. Наведіть умови виникання в лінії стоячих хвиль.
9. Як дослідним шляхом визначити довжину хвилі і частоту генератора, що живить лінію?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 23

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ КОТУШКИ БЕЗ МАГНІТОПРОВОДУ

Мета роботи: визначити експериментальним та аналітичним шляхами розподіл магнітного поля у циліндричній котушці без магнітопроводу, перевірити закон повного струму, засвоїти методи вимірювання напруженості магнітного поля балістичним гальванометром і спад магнітної напруги за допомогою магнітного поясу.

Теоретичні відомості

Напруженість магнітного поля \overline{H} у будь-якій точці циліндричної котушки може бути визначена експериментальним і аналітичним шляхом. Розглянемо методику розрахунку напруженості магнітного поля \overline{H} на осі циліндричної котушки без магнітопроводу.

Сумістимо вісь OX з віссю котушки і розташуємо початок координат у центрі котушки. Для наближеного розрахунку напруженості \overline{H} на осі котушки замінимо реальну багат шарову котушку одношаровою з тією ж кількістю витків, з тією ж довжиною і з тим же радіусом витків, який дорівнює середньому радіусу витків реальної котушки.

Напруженість магнітного поля на осі котушки вираховуємо за законом Біо–Савара–Лапласа. Відповідно до цього закону струм I , який проходить по лінійному провіднику довжиною $d\ell$, створює магнітне поле, яке у точці, віддаленій від елемента $d\ell$ на відстань r , має напруженість

$$d\overline{H} = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{[d\ell \cdot \overline{r}]}{r^3}, \quad (23.1)$$

де \overline{r} – радіус-вектор, направлений від елемента струму до точки, в якій визначається напруженість.

Модуль вектора $d\overline{H}$ визначається з виразу:

$$dH = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{d\ell \cdot \sin \alpha}{r^2}, \quad (23.2)$$

де α – кут між векторами $d\ell$ та $d\overline{r}$.

Вектор $d\overline{H}$ перпендикулярний до $d\ell$ та радіус-вектора \overline{r} і напрямлений у той бік, який визначається правилом правого гвинта.

Спочатку знайдемо напруженість магнітного поля у точці А, яка лежить на осі колового витка, по котрому тече струм I (рис. 23.1).

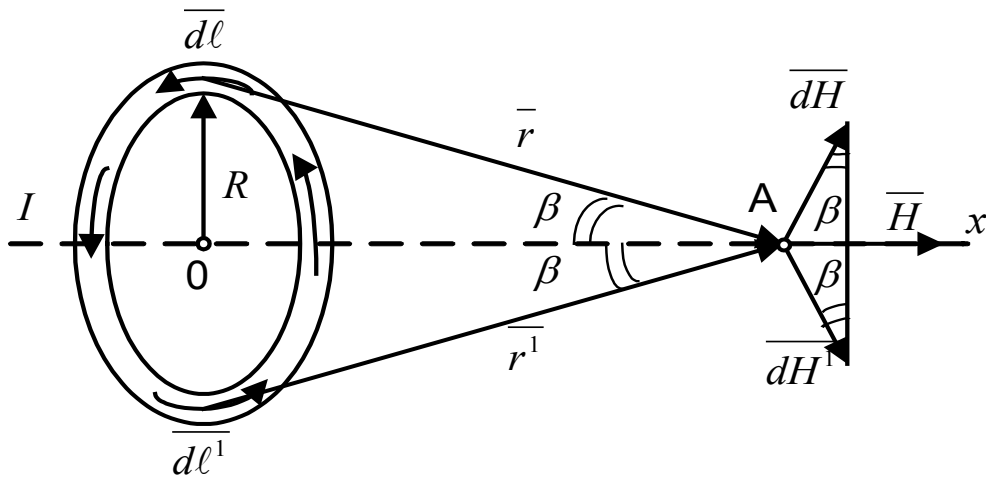


Рисунок 23.1

Нехай R – радіус витка. Для точок, що лежать на осі витка $r \perp dl$, $\alpha = 90^\circ$ і $\sin \alpha = 1$, тоді:

$$dH = \frac{I \cdot dl}{4\pi r^2}. \quad (23.3)$$

Кожні два рівних елементи витка \overline{dl} і \overline{dl}^1 , що лежать на протилежних кінцях діаметра витка, обумовлюють у точці А вектори \overline{dH} і \overline{dH}^1 , складові яких нормальні до осі ОХ, взаємно компенсуються. Навпаки, складові цих векторів, що направлені вздовж осі ОХ, додаються. Отже виходить, що при обчисленні напруженості магнітного поля \overline{H} у точці А, обумовленій струмом у всьому витку, достатньо врахувати тільки складову кожного елементарного вектора \overline{dH} , що направлена вздовж осі ОХ та дорівнює $\overline{dH} \cdot \sin \beta$, де β – кут між віссю ОХ і радіус-вектором \overline{r} .

Інтегруючи вираз (23.3) вздовж всього витка, одержимо формулу для напруженості магнітного поля на осі колового витка:

$$H = \oint_{\ell} dH \cdot dl \cdot \sin \beta = \int_0^{2\pi R} \frac{I dl \cdot \sin \beta}{4\pi r^2} = \frac{I \cdot \sin \beta}{4\pi r^2} \cdot 2\pi R = \frac{I \cdot R}{2r^2} \cdot \sin \beta. \quad (23.4)$$

Оскільки $\sin \beta = \frac{R}{r}$, то

$$H = \frac{I}{2} \cdot \frac{R^2}{r^3} = \frac{I}{2R} \cdot \sin^3 \beta. \quad (23.5)$$

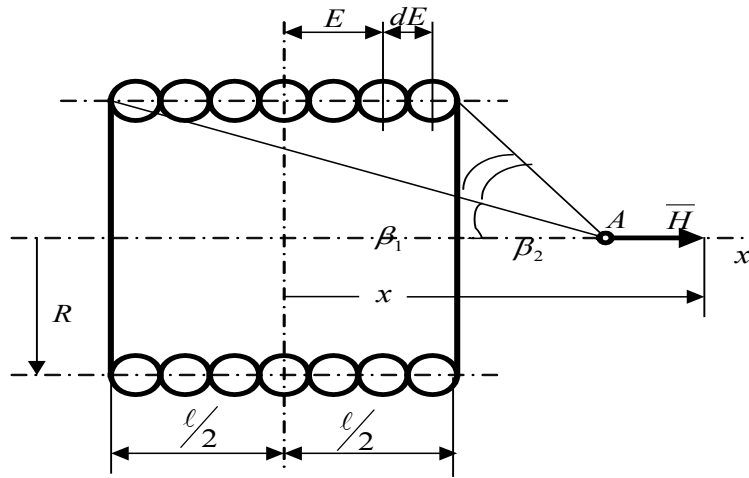


Рисунок 23.2

Використовуючи вираз (23.5), знайдемо напруженість магнітного поля у точці A , яка лежить на осі одношарової котушки, що має довжину ℓ , число витків W і радіус витків R (рис. 23.2).

Виділимо елемент довжини котушки dE . Його можна розглядати як дуже тонкий коловий контур зі струмом

$$di = \frac{I \cdot W}{\ell} \cdot dE. \quad (23.6)$$

Відповідно до (23.5), напруженість магнітного поля, яка буде викликана цим струмом, становить

$$dH = \frac{di}{2R} \cdot \sin^3 \beta. \quad (23.7)$$

Напруженість H у точці A , що створюється струмом всієї котушки, знайдемо інтегруванням виразу (23.7) по довжині всієї котушки, тобто:

$$H = \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \frac{I^2 \cdot W}{2\ell} \cdot \frac{\sin^3 \beta}{R} \cdot dE,$$

де $\frac{x - E}{R} = \text{ctg} \beta$, тоді $\frac{dE}{R} = \frac{d\beta}{\sin^2 \beta}$.

Таким чином

$$H = \frac{IW}{2\ell} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta \cdot d\beta = \frac{IW}{2\ell} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2), \quad (23.8)$$

де β_1, β_2 – крайні значення β , які відповідають краям котушки (рис. 23.2).

Косинуси цих кутів можна визначити за формулами:

$$\cos \beta_1 = \frac{x + \ell/2}{\sqrt{R^2 + (x + \ell/2)^2}}, \quad \cos \beta_2 = \frac{x - \ell/2}{\sqrt{R^2 + (x - \ell/2)^2}}, \quad (23.9)$$

де x – відстань точки A до середини котушки.

Порядок виконання роботи

1. Для експериментального визначення напруженості магнітного поля H потрібно скласти схему відповідно до рис. 23.3.

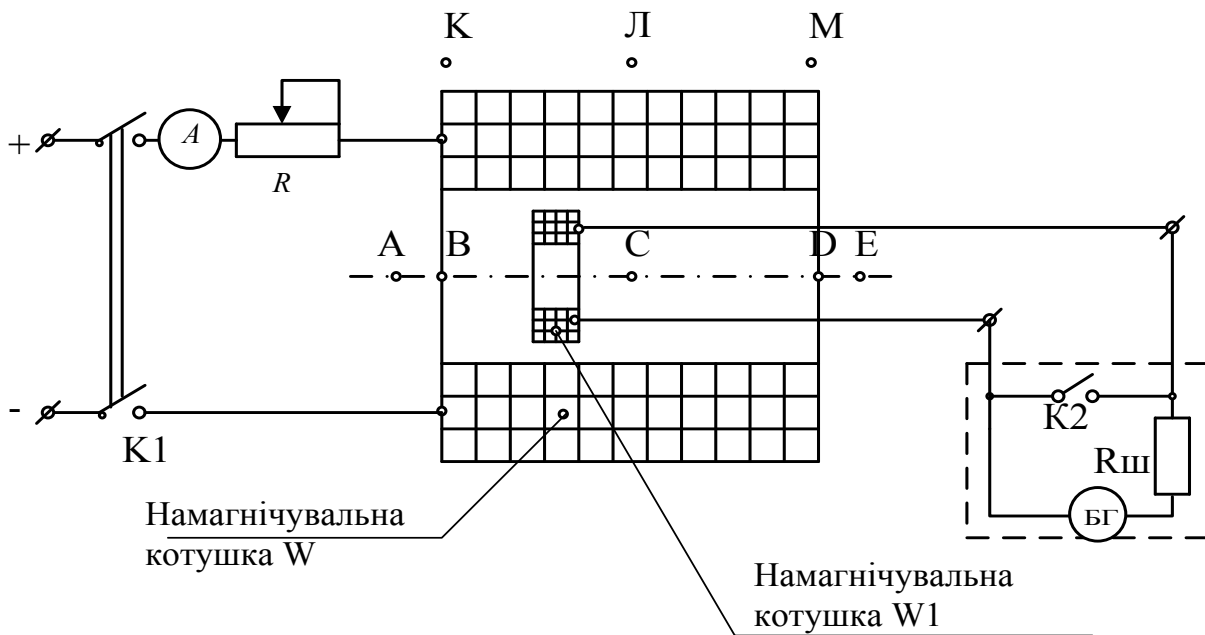


Рисунок 23.3

а) При розімкненні кола *соленоїда (solenoid)* (досліджуваної котушки) ключем $K1$ потрібно виміряти відхилення α по шкалі балістичного гальванометра БГ, який підключений до кола вимірювальної

катушки, розміщуючи останню послідовно в точках А, В, С, D, і Е на осі катушки.

б) Аналогічно вимірюють відхилення α гальванометра, розміщуючи вимірювальну катушку в точках К, Л, М зовні соленоїда. Дані вимірювань записують у таблицю 23.1.

Всі вимірювання виконувати при трьох значеннях струму в катушці.

Таблиця 23.1

№ вим.	Струм А	Величина	Одиниця вимірю- вання		Точки							
					А	В	С	D	Е	К	Л	М
1.		α	поділ.	вим.								
		H	A/м	вим.								
		H	A/м	розр.								
2.		α	поділ.	вим.								
		H	A/м	вим.								
		H	A/м	розр.								
3.		α	поділ.	вим.								
		H	A/м	вим.								
		H	A/м	розр.								

2. Для вимірювання магнітної сили F і спад у магнітної напруги $H \cdot \ell$ за допомогою магнітного поясу потрібно скласти схему відповідно до рис. 23.4.

а) При вимиканні соленоїда ключем К1 потрібно виміряти значення відхилення α по шкалі балістичного гальванометра БГ, який включений в коло магнітного поясу, розміщуючи останній вздовж замкненого шляху $AnBmA$, який охоплює всі витки соленоїда.

б) Аналогічно вимірюють відхилення α гальванометра, розміщуючи магнітний пояс всередині катушки між точками А і В. В цьому випадку пояс вкладають всередині катушки таким чином, щоб один його кінець був на одному рівні з одним торцем катушки, а другий вигинають і прикладають до другого кінця катушки.

в) Виміряти відхилення α гальванометра, розміщуючи магнітний пояс зовні катушки між точками А і В. В цьому випадку весь пояс розміщується зовні катушки, а його кінці прикладають до торців катушки з обох боків.

Всі вимірювання виконуються при тих самих значеннях струму, що і в першому експерименті. Результати вимірювання потрібно записати в таблицю 23.2.

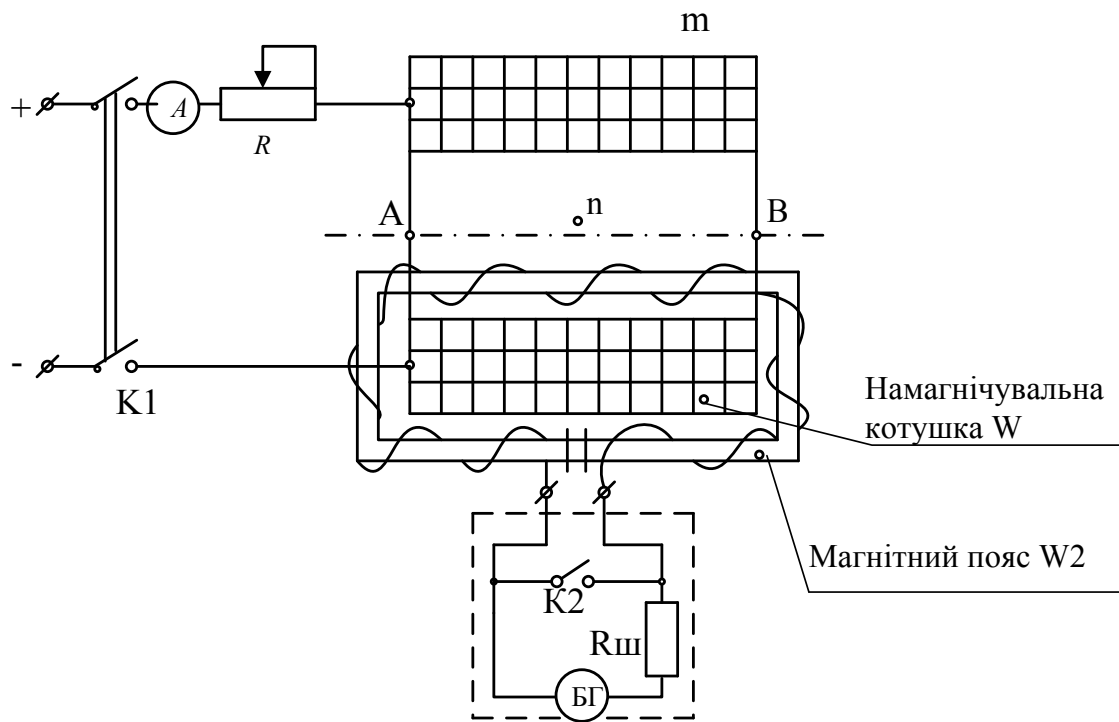


Рисунок 23.4

Таблиця 23.2

№ вим.	Струм	Величина	Одиниця вимірювання	Виміри		
				вздовж шляху AnBmA	всередині котушки AnB	зовні котушки AmB
1		α	поділ.			
		F	A			
2		α	поділ.			
		F	A			
3		α	поділ.			
		F	A			

Обробка результатів дослідів

1. За даними дослідів 1 вирахувати напруженість магнітного поля H для всіх точок і значень струму за формулою

$$H = \frac{C_{\psi}}{\mu_0 \cdot S_1 \cdot W_1} \cdot \alpha, \quad (23.10)$$

де C_{ψ} – балістична стала гальванометра при вимірюванні потоку;

S_1 – площа перерізу, яка охоплюється середнім витком вимірювальної котушки;

W_1 – число витків вимірювальної котушки.

2. Вирахувати напруженість магнітного поля H на осі соленоїда в точках А, В, С, D і Е за законом Біо–Савара–Лапласа за формулою (23.8). Результати вимірювань і розрахунків записати у таблицю 23.1 і порівняти.

3. За даними досліду 2 вирахувати магніторушійну силу F вздовж замкненого шляху $AnBmA$, а також його ділянок AnB та AmB за формулою

$$F = C \cdot C_{\psi} \cdot \alpha = K \cdot \alpha, \quad (23.11)$$

де C – стала магнітного поясу;

K – стала системи магнітний пояс – гальванометр.

Переконайтеся у справедливості закону повного струму.

Дані для розрахунків: $D_{cp} = 53,5$ мм ; $d_{cp} = 32,5$ мм; $W = 520$; $W_1 = 650$.

Контрольні запитання:

1. Які основні величини характеризують магнітне поле? Як вони пов'язані між собою?

2. Як визначити величину і напрямок напруженості магнітного поля за законом Біо–Савара–Лапласа?

3. Як вимірюється напруженість магнітного поля за допомогою балістичного гальванометра?

4. Як вимірюється спад магнітної напруги за допомогою поясу Роговського та балістичного гальванометра?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 24

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕЛОМЛЕННЯ СИЛОВИХ ЛІНІЙ СТАЦІОНАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ГРАНИЦІ РОЗДІЛУ ДВОХ СЕРЕДОВИЩ

Мета роботи: дослідити характер переломлення *силових ліній* (*flux lines*) стаціонарного електричного поля на границі розділу двох середовищ з різними питомими опорами і засвоєння методики моделювання електричних полів на електропровідному папері.

Теоретичні відомості

Основною характеристикою електропровідного паперу є питомий поверхневий опір на квадрат R_{\square} . Він дорівнює опору квадратного листа незалежно від його розмірів:

$$R_{\square} = \rho \cdot \frac{\ell}{\ell \cdot h} = \frac{\rho}{h} \quad (24.1)$$

де ρ – питомий опір матеріала листа $[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}]$;

ℓ – розмір листа по ширині і по довжині;

h – товщина листа.

Величина R_{\square} має розмірність опору і вимірюється у омах.

Електричне поле на границі розділу двох провідникових середовищ підпорядковується таким граничним умовам:

1. Дотичні складові вектора *напруженості електричного поля* (*intensity of electric field*) на границі розділу обох середовищ збігаються:

$$E_{\tau_1} = E_{\tau_2} \quad (24.2)$$

2. На границі розділу обох середовищ нормальні складові вектора густини струму дорівнюють одна одній:

$$\delta_{n_1} = \delta_{n_2} \quad (24.3)$$

або згідно із *законом Ома* (*the Ohm law*):

$$\gamma_1 \cdot E_{n_1} = \gamma_2 \cdot E_{n_2}.$$

Звідки

$$\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}, \quad \frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (24.4)$$

З цих умов випливає відомий закон заломлення силових ліній:

$$\frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_2} = \frac{R_{1\Box}}{R_{2\Box}}, \quad (24.5)$$

де θ_1 і θ_2 – кути в обох середовищах між лініями струму та нормаллями до поверхні розділу.

Лінії рівного потенціалу також переломлюються на колі, яке розділяє листи електропровідного паперу з різною величиною R_{\Box} . Означимо через θ_1^1 і θ_2^1 кути, які утворюються дотичними до лінії рівного потенціалу з лежачою у площині листа нормаллю до лінії розділу обох середовищ. Оскільки лінії напруженості поля завжди перпендикулярні до ліній рівного потенціалу, то будуть мати місце такі співвідношення:

$$\theta_1^1 = \frac{\pi}{2} - \theta_1; \quad \theta_2^1 = \frac{\pi}{2} - \theta_2. \quad (24.6)$$

Таким чином ми одержимо закон заломлення *еквіпотенціальних ліній* (*equipotential curve*):

$$\frac{\operatorname{tg}\theta_1^1}{\operatorname{tg}\theta_2^1} = \frac{R_{1\Box}}{R_{2\Box}}. \quad (24.7)$$

Також між тангенсами кутів падіння силових і еквіпотенціальних ліній існують відомі співвідношення:

$$\operatorname{tg}\theta_1 = \frac{1}{\operatorname{tg}\theta_1^1} = \frac{E_{\tau 1}}{E_{n1}} \quad \text{і} \quad \operatorname{tg}\theta_2 = \frac{1}{\operatorname{tg}\theta_2^1} = \frac{E_{\tau 2}}{E_{n1}}. \quad (24.8)$$

Через те, що струм до електропровідного паперу підводиться за допомогою двох масивних алюмінієвих електродів, які мають малий електричний опір, можна наближено вважати, що вони є лініями рівного потенціалу, а поле у електропровідному листі є плоскопаралельним.

У роботі досліджується стаціонарне електричне поле у сусідніх середовищах з таким співвідношенням параметрів:

$$R_1 = 2R_2.$$

Характер поля в цьому випадку визначається стаціонарними зарядами, котрі наводяться на поверхні розділу і ослаблюють поле всередині кола. Таким чином напруженість електричного поля всередині кола зменшується пропорційно відношенню опорів електропровідного паперу зовні і всередині кола $R_{1\Box}/R_{2\Box}$.

Для зняття еквіпотенціальних ліній використовується одинарний зонд. Потенціометром R задаємо потенціали з кроком $\Delta U=1\text{В}$. Одинарним зондом, з'єднаним з нуль-індикатором, починаючи з лівого або правого краю моделі, відшуковуємо точки рівного потенціалу. Плавна з'єднуючи між собою знайдені точки, отримуємо еквіпотенціальні лінії.

Для побудови силових ліній використовується подвійний зонд з базою 5 мм. Суміщаючи середину зонда з заданою точкою поля і повертаючи зонд навколо неї, знаходимо положення, при якому стрілка мілівольтметра установлюється на нулі. Це буде означати, що електроди зонда розташовані вздовж еквіпотенціальної лінії і вектор \vec{E} лежить на прямій, яка збігається зі стрілкою подвійного зонда. Залишається встановити, збігається цей напрямок стрілки подвійного зонда з напрямком вектора \vec{E} чи протилежний йому. Для цього злегка повернемо зонд за годинниковою стрілкою і помітимо, в якому напрямку відхиляється стрілка приладу.

Відхилення вправо означає, що спад потенціалу навколо дослідної точки відбувається в напрямку стрілки. Тобто в вихідному положенні ця стрілка вказувала напрямок вектора \vec{E} . Відхилення стрілки приладу вліво вказує, що спад потенціалу навколо зонда відбувається у зворотному напрямку і вектор \vec{E} направлений протилежно стрілці подвійного зонда.

Визначивши напрямок вектора \vec{E} у вихідній точці, переміщуємо подвійний зонд в цьому напрямку і повторюємо дослід. Потім знову переміщуємо зонд в напрямку вектора \vec{E} і визначаємо його напрямок у третій точці і т. д. Лінія, вздовж якої буде переміщуватись середня точка зонда, буде вказувати розташування силової лінії поля, яка проходитиме через вихідну точку.

Для експериментальної перевірки законів заломлення силових і еквівалентних ліній необхідно виміряти нормальну E_n і тангенціальну E_t складові напруженості електричного поля. Для цього проведемо олівцем вісім відрізків радіальних прямих, які будуть відображати нормалі до лінії розділу двох середовищ. Розташовуючи подвійний зонд з обох боків від границі розділу так, щоб лінія, яка з'єднує електроди зонда, збігалася з нормаллю до границі, з'ясуємо, що нормальні складові вектора \vec{E} в різних точках мають різні значення, але їх відношення відповідає другій граничній умові і для кожної моделі однакові. Наявність стрибка нормальної складової вектора \vec{E} означає, що поверхня розподілу двох середовищ вкрита стаціонарними електричними зарядами.

Для перевірки другої граничної умови подвійний зонд розташовуємо так, щоб лінія, яка з'єднує електроди, була направлена по дотичній до поверхні розділу (перпендикулярна до нормалі) і вимірюємо дотичні складові вектора \vec{E} з обох боків від границі розділу. Хоч значення E_t в різних точках границі розділу будуть різні, але їх значення в двох близьких точках, розташованих з обох боків від границі розділу, мають бути однаковими, що відповідає другій граничній умові.

Опис дослідної установки

Установка складається з прямокутного листа низькоомного електропровідного паперу, в центрі якого наклеєний кружечок того ж паперу діаметром 22 см. Два протилежних краї моделі затиснуті за допомогою алюмінієвих електродів, з'єднаних з клемами.

Питомі поверхневі опори зовнішніх частин моделі і внутрішнього кола відповідають такому співвідношенню $R_1 = 2R_2$.

Між електродами моделі пропускається постійний струм, який підтримується незмінним протягом досліду. Джерело живлення – акумуляторна батарея напругою 10 В. Вся вимірювальна схема (рис. 24.1) складена у одному блоці з дослідною моделлю.

Порядок виконання роботи

1. Включити живлення моделі (рис. 24.1).
2. Потенціометром R задати потенціали ліній через 1 В.
3. Включити тумблер в положення «Одинарний зонд» і за допомогою одинарного зонда і нуль-індикатора знайти на моделі екіпотенціальні лінії, які відповідають заданим потенціалам. За початкову лінію взяти лінію, проведену вздовж внутрішнього краю одного з кутків.
4. Знайдені точки екіпотенціальних ліній нанести на міліметровий папір, зберігаючи нумерацію ліній і координатної сітки електропровідного паперу.
5. Включити тумблер в положення «Подвійний зонд» і за допомогою подвійного зонда та мілівольметра знайти силові лінії електричного поля, яке утворюється двома паралельними електродами на моделі. Особливо ретельно необхідно досліджувати силові лінії на границі розділу двох середовищ.
6. Знайдені точки силових ліній нанести на той самий міліметровий папір, де відмічались точки екіпотенціальних ліній моделі.

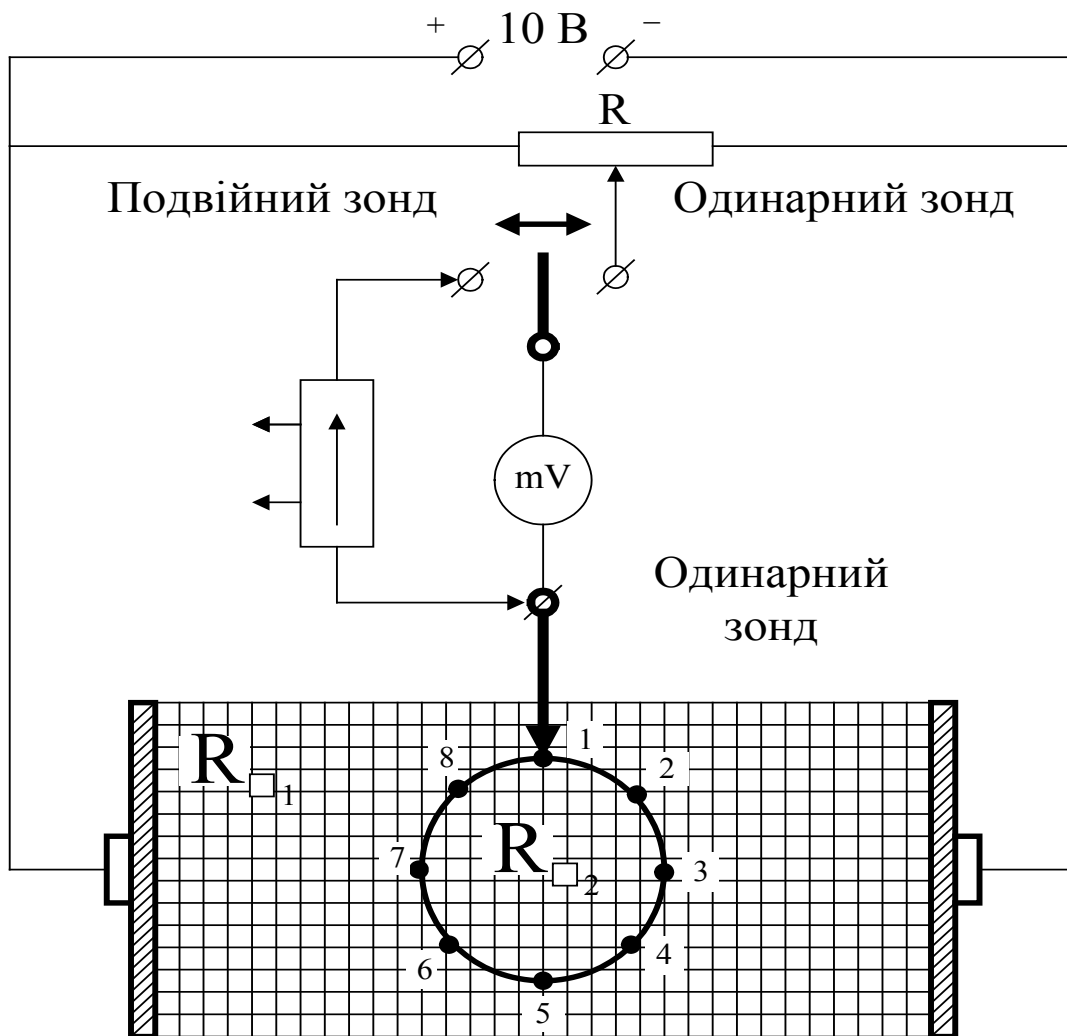


Рисунок 24.1

7. У восьми точках з обох боків границі розділу середовищ за допомогою подвійного зонда виміряти нормальну E_n і тангенціальну E_τ складові напруженості електричного поля.

8. Результати вимірювань занести до табл. 24.1.

Таблиця 24.1

Точки вимірювань	E_n		E_τ	
	внутр.	зовн.	внутр.	зовн.

Обробка результатів досліду

1. Відповідно до експериментальних даних побудувати на міліметровому папері кольоровими олівцями зняту картину електричного поля: лінії рівного потенціалу і силової лінії.
2. Пояснити характер заломлення екіпотенціальних і силових ліній поля на границі розділу двох середовищ.
3. Перевірити теоретичні граничні умови і закони заломлення силових ліній на границі розділу двох середовищ.
4. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення напруженості та потенціалу електричного поля та наведіть зв'язок між ними.
2. Наведіть граничні умови електричного поля.
3. За допомогою яких ліній графічно зображаються електричні поля?
4. Поясніть методику експериментального визначення картини електричного поля.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 25

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ДВОПРОВІДНОЇ ЛІНІЇ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНОМУ ПАПЕРІ

Мета роботи: дослідити електричне поле двопровідної лінії передачі на моделі і переконатися в існуванні аналогії між електричним полем постійного струму у провідному середовищі та електростатичним полем у діелектрику.

Теоретичні відомості

Між величинами, що характеризують електричне поле постійних струмів у провідному середовищі зовні джерел енергії, та величинами, які характеризують електростатичне поле у діелектрику поза зарядами, існує формальна аналогія і збігаються граничні умови.

Формальна аналогія встановлюється за видом рівнянь:

1) електричне поле у провідному середовищі:

$$\operatorname{rot} \bar{E} = 0; \quad \int_B^A \bar{E} \cdot d\bar{\ell} = \varphi_A - \varphi_B; \quad \bar{\delta} = \gamma \bar{E}; \quad \operatorname{div} \bar{\delta} = 0; \quad \int_S \bar{\delta} \cdot d\bar{S} = i;$$

2) електростатичне поле у діелектрику:

$$\operatorname{rot} \bar{E} = 0; \quad \int_B^A \bar{E} \cdot d\bar{\ell} = \varphi_A - \varphi_B; \quad \bar{D} = \varepsilon_a \bar{E}; \quad \operatorname{div} \bar{D} = 0; \quad \oint_S \bar{D} \cdot d\bar{S} = q,$$

з яких виходить, що вектору електричного зміщення \mathbf{D} у електростатичному полі відповідає вектор густини електричного струму $\bar{\delta}$, заряду q – струм i , $\varepsilon \rightarrow \gamma$ і т. д. Крім того, у електричному полі провідне тіло, яке межує з діелектриком, є поверхнею рівного потенціалу, тобто вектор \bar{D} до неї нормальний. При протіканні струму у середовищі з дуже малою питомою провідністю можна знехтувати спадом напруги всередині провідного тіла з високою провідністю і вважати його поверхнею рівного потенціалу.

За цих умов картина поля провідного середовища буде збігатися з картиною електростатичного поля, що оточує заряджене тіло. Установлена аналогія дозволяє замінити дослідження електростатичного поля в діелектричному середовищі експериментальним дослідженням поля струмів у провідному середовищі і навпаки.

В роботі двопровідна лінія подана двома циліндричними нескінченно довгими електродами з нескінченно великою питомою провідністю, які оточує середовище з дуже малою питомою провідністю. Для дослідження картини поля двопровідної лінії достатньо дослідити плоскопаралельне поле, створене двома електродами у електропровідному папері, розташованому нормально до електродів. При пропусканні струму через електропровідний папір від електрода I до електрода II лініями струму в ньому будуть кола, що проходять через електроди, а лініями рівного потенціалу – також кола з центрами на прямій, яка проходить через осі електродів.

Дослід полягає в тому, щоб одержати на електропровідному папері сімейство ліній рівного потенціалу. Для цього на електроди I і II електропровідного паперу подається постійна напруга 10 В. Для зняття екіпотенціальних ліній використовується одинарний зонд. Потенціометром R задаємо потенціали з кроком $\Delta U = 1$ В. Одинарним зондом, що з'єднаний з нуль-індикатором, починаючи з лівого або правого електродів, відшуковуємо точки рівного потенціалу. Для симетричного розташування екіпотенціальних ліній за нульову точку вибираємо точку O, яка лежить на середині відстані між I та II електродами.

Для побудови силових ліній використовується подвійний зонд з базою 5 мм. Суміщаючи середину зонда з заданою точкою поля і повертаючи зонд навколо неї, знаходимо положення, при якому стрілка мілівольтметра устанавлюється на нулі. Це буде означати, що електроди зонда розташовані вздовж екіпотенціальної лінії і вектор \vec{E} лежить на прямій, яка збігається зі стрілкою подвійного зонда. Залишається встановити, збігається цей напрямок стрілки подвійного зонда з напрямком вектора \vec{E} чи протилежний йому. Для цього злегка повернемо зонд за годинниковою стрілкою і помітимо, в якому напрямку відхиляється стрілка приладу. Відхилення стрілки приладу вправо означає, що спад напруги навколо дослідної точки відбувається в напрямку стрілки; таким чином, в вихідному положенні ця стрілка вказує на напрямок вектора \vec{E} . Відхилення стрілки приладу вліво вказує, що спад напруги навколо зонда відбувається у зворотному напрямку і вектор \vec{E} напрямлений протилежно стрілці подвійного зонда.

Визначивши напрямок вектора \vec{E} у вихідній точці, переміщуємо подвійний зонд в цьому напрямку і повторюємо дослід. Потім знову переміщуємо зонд в напрямку вектора \vec{E} і визначимо його напрямок у третій точці і т. д. Лінія, вздовж якої буде переміщуватись середня точка зонда, вказує розташування силової лінії поля, яка буде проходити через вихідну точку.

Рівняння лінії рівного потенціалу двопровідної лінії має вигляд:

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_2}{r_1} = \text{const} \quad \text{або} \quad \frac{r_2}{r_1} = k = \text{const}. \quad (25.1)$$

і описує коло з центром на осі ОХ (рис. 25.1) з координатою центра

$$x_0 = \frac{1+k^2}{1-k^2} \cdot B \quad (25.2)$$

і радіусом

$$R_0 = \frac{2k}{|1-k^2|} \cdot B. \quad (25.3)$$

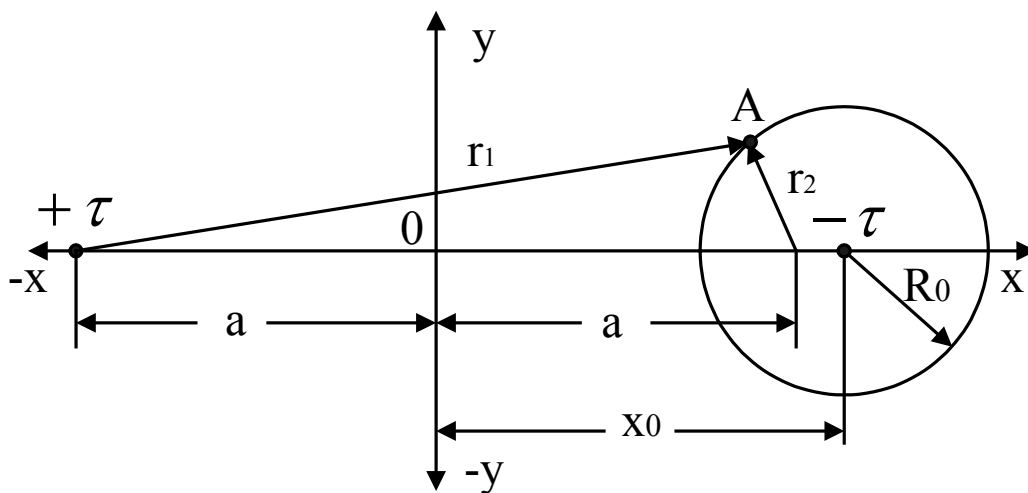


Рисунок 25.1

Через те, що радіус електродів значно менший порівняно з відстанню між ними, електричні осі τ , які відображають лінії, можна вважати збіжними з геометричними осями електродів. Число k дорівнює відношенню відстаней від будь-якої точки А, взятої на лінії рівного потенціалу, до електричних осей τ електродів. Для середньої лінії $k = 1$. Визначають k для крайньої лінії, знятої дослідним шляхом: для наступних ліній число k вибирають таким чином, щоб приріст потенціалу між сусідніми екіпотенціальними лініями був однаковим. Для цього має виконуватись така умова

$$\frac{k_{n+1}}{k_n} = B = \text{const}, \quad (25.4)$$

де n – порядковий номер лінії.

Таким чином, коефіцієнт k при збільшенні порядкового номера лінії повинен змінюватись за геометричною прогресією.

Кола, що відповідають лініям струму, будують таким чином, щоб одержати трубки рівного струму, які будуть відповідати трубкам рівного потоку вектора електричного зміщення для електростатичного поля. Ці кола проходять через центри електродів. Як видно з рис. 25.2, θ – кут, під яким бачиться відрізок, що з'єднує центри електродів, з точок, які лежать на лінії струму.

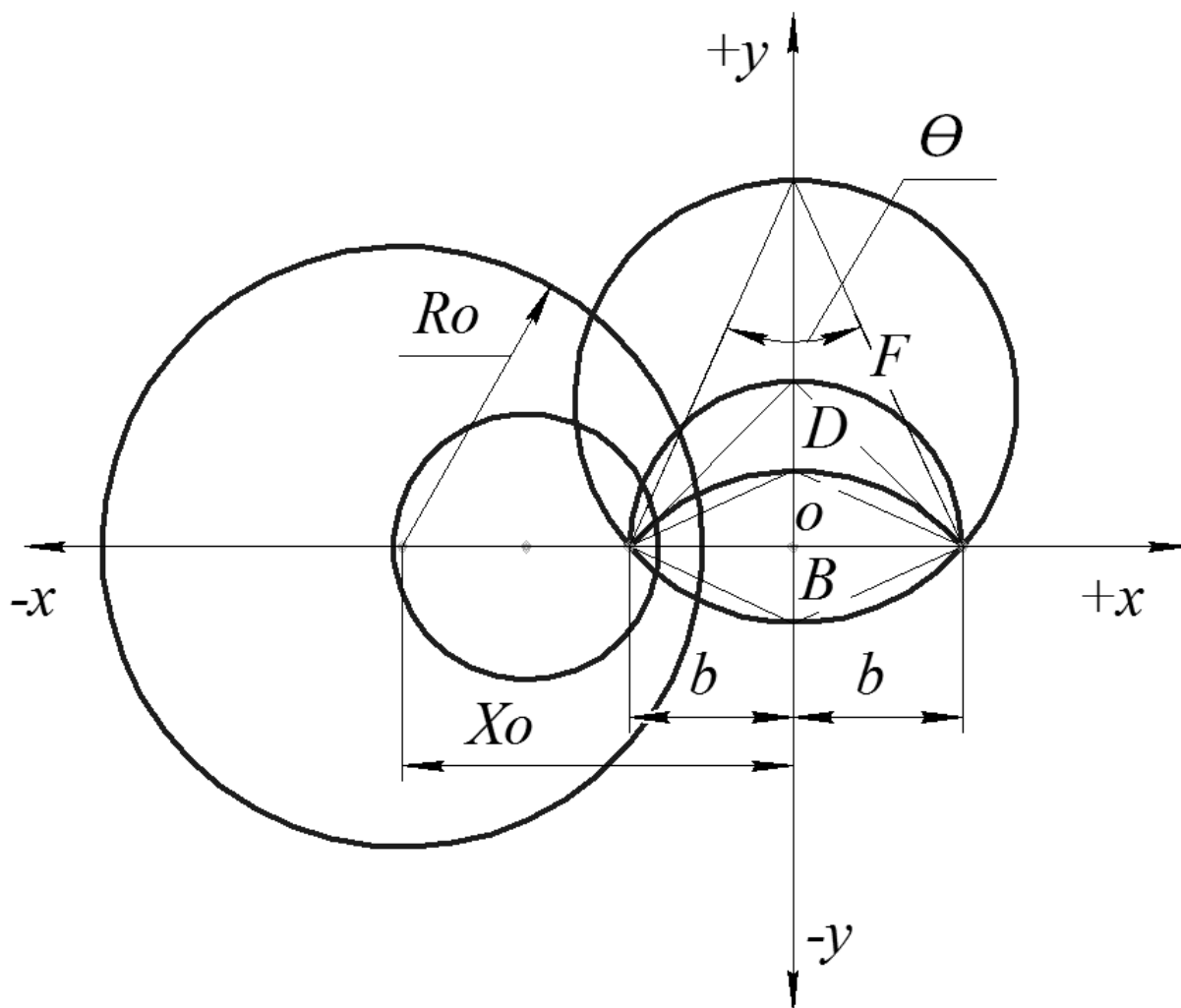


Рисунок 25.2

Для побудови трубок рівного струму необхідно будувати ці лінії так, щоб кут θ змінювався на одну і ту ж величину $\Delta\theta = const$. З цією метою проводять з центра одного з електродів прямі до кінців діаметра АВ. Кут α між цими прямими ділять на рівні частини $\Delta\alpha$. Проводять промені, які відстають один від одного на кут $\Delta\alpha$. Точки перетину F, D, O цих променів з прямою АВ лежать на шуканих лініях струму.

Зміст роботи

Установка живиться від акумуляторної батареї напругою 10 В. Вся вимірювальна схема установки (рис. 25.3) складена в одному блоці з дослідною моделлю.

Експериментальним шляхом будується картина електричного поля двох електродів на електропровідному папері і установлюється аналогія з картиною електричного поля у діелектрику (повітрі) навколо двопровідної лінії передачі.

Порядок виконання роботи

1. Включити живлення установки (рис. 25.3).

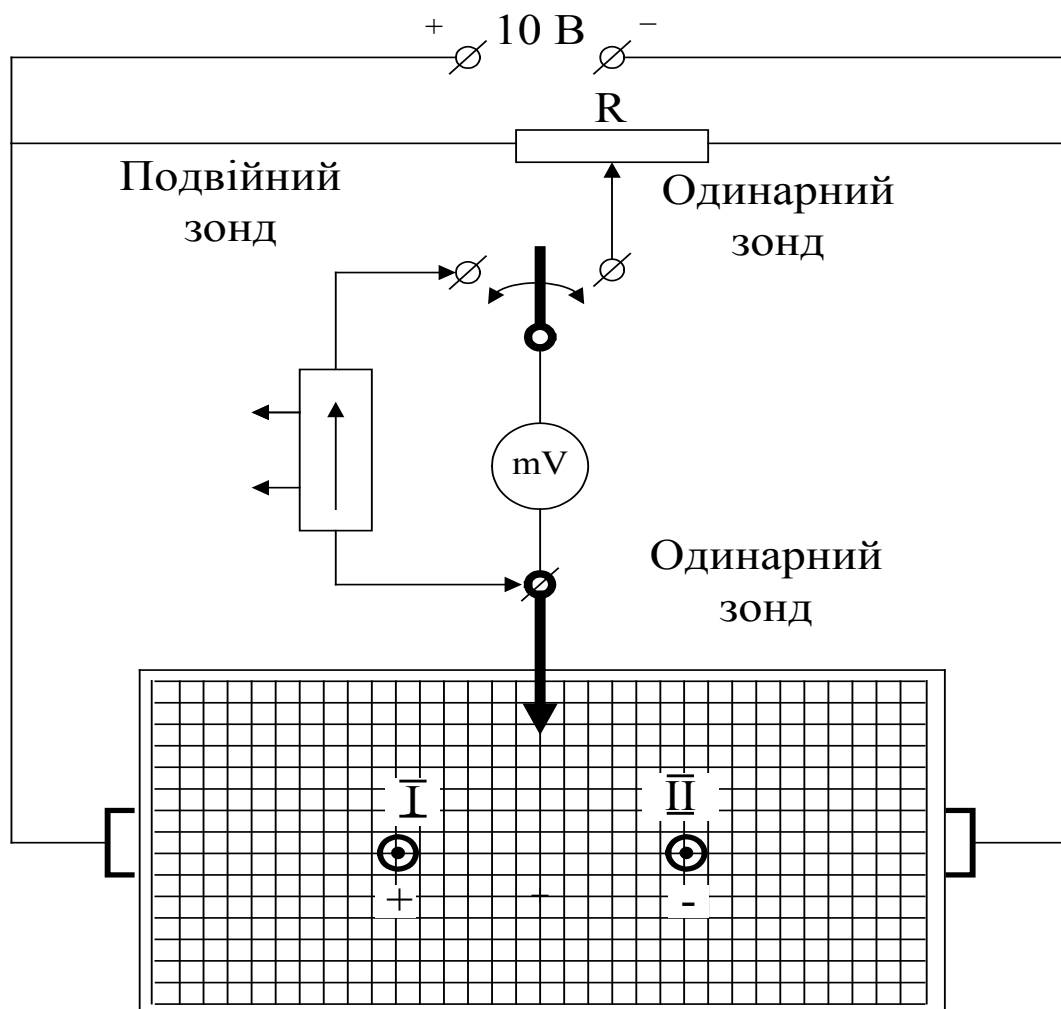


Рисунок 25.3

2. Потенціометром R задати потенціали еквіпотенціальних ліній 0, 1, 2...

3. Включити тумблер в положення «Одинарний зонд» і за допомогою одинарного зонда і нуль-індикатора знайти на моделі екіпотенціальні лінії, які відповідають заданим потенціалам. Нульову лінію провести через точку O , яка лежить по середині відрізка, який з'єднує осі електродів.

4. Знайдені точки екіпотенціальних ліній нанести на міліметрівку, зберігаючи нумерацію ліній і координатної сітки електропровідного паперу.

5. Включити тумблер в положення «Подвійний зонд» і за допомогою подвійного зонда і мілівольтметра знайти силові лінії електричного поля, яке утворюється двома електродами у електропровідному папері.

6. Знайдені точки силових ліній нанести на ту ж міліметрівку, де відмічались точки екіпотенціальних ліній моделі.

Обробка результатів дослідів

1. Згідно з експериментальними даними побудувати на міліметрівці кольоровими олівцями зняту картину електричного поля: лінії рівного потенціалу та силові лінії.

2. Розрахувати і побудувати теоретичну картину електричного поля двопровідної лінії.

3. На картину поля, одержану експериментально, нанести картину, одержану теоретично.

4. Зробити висновки.

Контрольні запитання:

1. Дайте визначення напруженості та потенціалу електричного поля та наведіть зв'язок між ними.

2. Наведіть граничні умови електричного поля

3. За допомогою яких ліній графічно зображаються електричні поля?

4. Поясніть методику експериментального визначення картини електричного поля.

5. Що собою являють екіпотенціальні лінії електричного поля двох паралельних осей?

6. В чому зміст методу електростатичної аналогії і як він використовується в роботі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 26

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ КУЛЬОВОГО ЗАЗЕМЛЮВАЧА

Мета роботи: дослідження кульового заземлювача методом моделювання його електричного поля у електролітичній ванні.

Теоретичні відомості

На цій лабораторній установці відтворюється у невеликому масштабі явище розтікання струму в землі від заритих в неї металевих провідників, які використовуються для заземлення тих чи інших точок електричних пристроїв або електричних кіл. Систему таких заритих у землю провідників називають заземлювачем. Опір, який зустрічає струм при його розтіканні в землі від заземлювача, називають опором заземлення, при цьому опором самих металевих заземлювачів звичайно нехтують.

У електроенергетичних пристроях при коротких замиканнях на землю довільних точок електричного кола, які у нормальних умовах не повинні мати контакт з землею, виникають великі струми короткого замикання, що будуть проходити через заземлювачі, землю і місце ушкодження електричного кола. Спад напруги на поверхні землі навколо заземлювача залежить від значення струму короткого замикання і від опору заземлення. Дуже важливо намагатися його зменшувати. Цього можна досягти зменшенням опору заземлення.

Важливо надати системі заземлювальних провідників таку форму, при якій спад напруги від струмів короткого замикання, що виникає на поверхні землі на довжині кроку людини (так звана крокова напруга), ніде не перевищував значення, при яких через людину може проходити небезпечний для її життя струм.

Формули для опору R заземлення можуть бути виведені на основі методу електростатичної аналогії за відомими формулами для ємності C певним чином розташованих тіл, оскільки основний опір розтіканню струму зосереджується поблизу електрода, де густина струму в землі найбільша.

Оскільки ємність кульового заземлювача

$$C = 4\pi\epsilon \cdot r_{ш}, \quad (26.1)$$

то провідність і опір кульового заземлення будуть:

$$G = 4\pi\gamma \cdot r_{ш}; \quad R = \frac{1}{4\pi\gamma \cdot r_{ш}}. \quad (26.2)$$

Аналогічно визначають опір півкульового заземлювача:

$$R = \frac{1}{2\pi\gamma \cdot r_{uz}}, \quad (26.3)$$

де γ – провідність середовища навколо кулі;

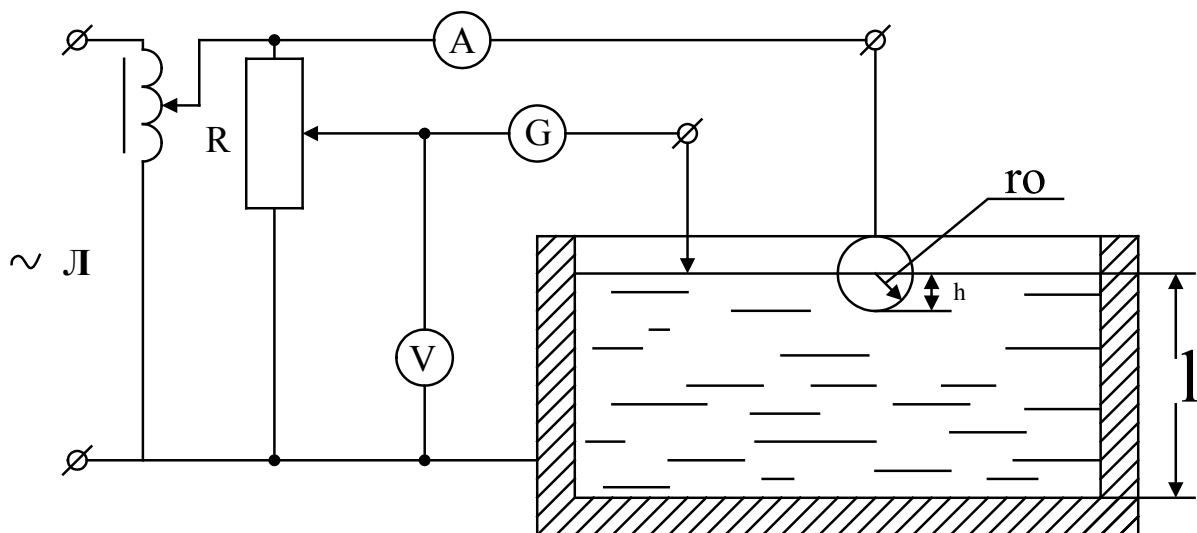
r_{uz} – радіус кулі.

Знаючи опір заземлення, можна вирахувати струм розтікання:

$$I = \frac{U}{R}$$

Опис дослідної установки

Установка (рис. 26.1) складається з електромагнітної ванни, пантографного пристрою та електродів. Живлення установки відбувається від джерела змінної напруги через автотрансформатор. Ванна розміром 250×500×240 мм виконана з нержавіючої сталі. Розміри ванни порівняно з розміром електродів вибрані значно більшими, щоб форма ванни менше відбивалася на результатах дослідів.



Пантограф складається з двох взаємно перпендикулярних лінійок і каретки. Одна з лінійок може вільно пересуватись відносно каретки. Зонд, який являє собою тонку ізольовану проволочку, закріплюється на каретці. Один кінець зонда може опускатись в воду на довільну глибину, а другий кінець підключений до вимірювальної схеми.

Як заземлювач використовується металева куля радіусом $r_u = 13,5$ мм. Провідним середовищем може бути звичайна водопровідна вода з питомою провідністю $\gamma = 4,3 \cdot 10^6$ сім/м.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему відповідно до рис. 26.1. Між ванною і кулькою підтримується напруга 10 В.

2. Занурюючи кульку на глибину, яка дорівнює його радіусу $h = r_u$, вимірюємо струм розтікання, а за допомогою одинарного зонда і вимірної схеми знімаємо криву розподілу потенціалу по поверхні води вздовж радіальної лінії від поверхні кульки до стінки бака.

3. Занурюючи кульку на глибину, яка дорівнює половині висоти рівня води $h = \ell / 2$, повторюємо вимірювання.

Обробка результатів дослідження

1. Відповідно експериментальних даних вирахувати опори заземлення при $h = r_u$ та $h = \ell / 2$;

2. Побудувати криві розподілення потенціалу на поверхні води вздовж радіальної лінії при $h = r_u$ та $h = \ell / 2$ в функції відстані від кульки.

3. Теоретично вирахувати опори заземлення і струм розтікання для заземлювачів, які мають форму кулі та півсфери, результати порівняти з експериментом.

4. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які рівняння описують поле в провідному середовищі?
2. Наведіть граничні умови поля в провідному середовищі.
3. Дайте визначення крокової напруги.
4. Як визначити опір заземлення?
5. В чому зміст методу електростатичної аналогії?

СЛОВНИК ІНШОМОВНИХ ТЕРМІНІВ

р-п перехід	p-n junction
активна потужність	active power
активний опір	active resistance
амплітудне значення	peak value
векторна діаграма	vector diagram
випрямляч	rectification circuit
вихрові струми	foucault currents
вітка	branch
вольт-амперна характеристика	voltage-current curve
гістерезис	hysteresis
граничні умови	boundary conditions
джерело напруги	voltage source
диференціальне рівняння	differential equation
диференціальний опір	differential resistance
діод	diode
діркова провідність	acceptor-type conductivity
діюче значення змінного струму	operating value of an alternating current
довга лінія	range line
довжина хвилі	wave length
дослід короткого замикання	short-circuit test
дослід холостого ходу	open-circuit test
другий закон Кірхгофа	Kirchhoff voltage law
еквіпотенціальні лінії	equipotential curve
електричне коло	electric circuit

електронна провідність	electronic conductivity
ємність	capacity
електричне поле	electric field
електрорушійна сила	electromotive force
закони комутації	connection laws
закон Ома	the Ohm law
закон повного струму	rms current law
імпульсна характеристика	pulse response
індуктивність	inductance
індуктивність розсіювання	stray inductance
інтеграл Дюамеля	Duhamel integral
коефіцієнт стабілізації	stabilization factor
комутація	connection
катушка з феромагнітним сердечником	ferromagnetic core inductor
лінійний елемент	linear element
лінійне коло	linear circuit
магнітна індукція	magnetic induction
магнітне поле	magnetic field
магнітний потік	magnetic flow
миттєве значення	instant value
напівпровідник	semiconductor
напруга	voltage
напруженість електричного поля	intensity of electric field
напруженість магнітного поля	intensity of magnetic field
нелінійне електричне коло	non-linear circuit
нелінійний елемент	non-linear element

операторна форма	operator form
паралельне з'єднання	parallel connection
параметричний стабілізатор	parametric stabilizer
передавальна функція	transfer function
перехідна характеристика	transient response
перехідний процес	transient
перший закон Кірхгофа	Kirchhoff current law
повний опір	impedance
послідовне з'єднання	serial connection
початкові умови	initial conditions
провідність	conductivity
реактивний опір	reactive resistance
резистор	resistor
силові лінії	flux lines
синусоїдний струм	sinusoidal current
соленоїд	solenoid
стала часу	time constant
струм	current
трансформатор	transformer
ферорезонанс	ferro resonance
функція Хевісайда	heaviside function
характеристичне рівняння	defining equation
хвильові процеси	wave process
частота	frequency

ЛІТЕРАТУРА

1. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами : підручник / [Карпов Ю. О., Кацев С. Ш., Кухарчук В. В. та ін.] ; під ред. проф. Ю. О. Карпова. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 377 с.

2. Теоретичні основи електротехніки : у 3 т. : підручник / [Бойко В. С., Бойко В. В., Видолуб Ю. Ф. та ін.] за ред. І. М. Чиженко, В. С. Бойко. – К. : Політехніка, 2004.

Т. 1. : Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 2004. – 272 с.

3. Теоретические основы электротехники : в 3-х т. : [учебник для вузов] / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровин, В. Л. Чечурин. – [4 изд.]. – СПб. : Питер, 2003.

Том 1 : – 2003. – 463 с.

Том 2 : – 2003. – 576 с.

4. Карпов Ю. О. Конспект лекцій з курсу «Теоретичні основи електротехніки». Ч. 1. / Карпов Ю. О., Магас Т. Є., Мадьяров В. Г. – Вінниця : ВПІ, 1992. – 174 с.

5. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Комп'ютерні розрахунки та моделювання лінійних електричних кіл : навчальний посібник / Карпов Ю. О., Кацев С. Ш., Кухарчук В. В. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 213 с.

6. Кацев С. Ш. Комп'ютерне моделювання електричних кіл : лабораторний практикум / Кацев С. Ш., Мад'яров В. Г., Говор І. К. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 89 с.

Навчальне видання

**Мадьяров В'ячеслав Губейович
Коваль Андрій Миколайович
Говор Ігор Костянтинівич**

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ЧАСТИНА 2

Лабораторний практикум

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено А. Ковалем

Підписано до друку 05.01.2018.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 6,9.
Наклад 50 (1-й запуск 1-20) пр. Зам. № 2018-013.

Видавець та виготовлювач
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.