

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА



МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання
лабораторних робіт
з навчальної дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ. ЧАСТИНА 3»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
усіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітні програми «Електротехнічні системи електроспоживання»,
«Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2022

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Теоретичні основи електротехніки. Частина 3» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти усіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітні програми «Електротехнічні системи електроспоживання», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 35 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун,
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова

Рецензент

Д. В. Тугай, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 10 від 22 лютого 2022 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 «ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ».....	7
1.1 Мета роботи.....	7
1.2 Обладнання і прилади	7
1.3 Підготовчий етап лабораторної роботи	7
1.4 Загальні відомості	7
1.5 Порядок виконання роботи	10
1.6 Обробка експериментальних даних.....	13
Контрольні запитання.....	13
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ»...	14
2.1 Мета роботи.....	14
2.2 Обладнання і прилади.	14
2.3 Підготовчий етап лабораторної роботи	14
2.4 Загальні відомості	14
2.5 Порядок виконання роботи	18
2.6 Обробка експериментальних даних.....	22
Контрольні запитання.....	22
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 « ДОСЛІДЖЕННЯ СИМЕТРИЧНОГО ЧОТИРИПОЛЮСНИКА ТА ЛІНІЇ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ».....	23
3.1 Мета роботи.....	23
3.2 Обладнання і прилади..	23
3.3 Підготовчий етап лабораторної роботи	23
3.4 Загальні відомості	23
3.5 Порядок виконання роботи	27
3.6 Обробка експериментальних даних.....	29
Контрольні запитання.....	30
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	31
ДОДАТКИ.....	32

ВСТУП

Електротехнікою називають область техніки, що пов'язана з отриманням, розподілом, перетворенням і використанням електричної енергії, або, іншими словами, це широка галузь практичного застосування електромагнітних явищ. «Теоретичні основи електротехніки» (далі – ТОЕ) – дисципліна, яка займається питаннями розрахунку й вивчення явищ, що характеризують поняттями електричних струмів, напруг, потужностей, магнітних потоків, а також поняттями напруженості електричного та індукції магнітного полів. Таким чином, ТОЕ є теоретичною базою для всіх електротехнічних спеціальностей.

Вивчення курсу ТОЕ потребує знання курсів фізики, а саме розділу «Електрика та магнетизм», вищої математики (системи лінійних алгебраїчних рівнянь, теорія матриць, похідна та інтеграл, диференціальні рівняння, функціональні ряди, інтегральні перетворення Лапласа, векторна алгебра тощо).

Студенти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітніх програм «Електротехнічні системи електроспоживання», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» впродовж трьох семестрів вивчають відповідно першу, другу та третю частини дисципліни.

Теоретичні положення курсу засвоюються ґрунтовно тільки тоді, коли вони застосовані для вирішення конкретних задач. Саме тому лабораторні роботи відіграють важливу роль при вивченні дисципліни «Теоретичні основи електротехніки». Метою їх проведення є набуття студентами навичок практичних досліджень електричних кіл та отримання під час виконання розрахункової частини підтвердження положень теорії.

Ці методичні вказівки складені відповідно до робочої програми навчальної дисципліни «Теоретичні основи електротехніки. Частина 3» і призначені для студентів усіх форм навчання.

Правила безпеки в лабораторії ТОЕ

До виконання лабораторних робіт допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки з наступним записом про це в спеціальному журналі. Значення напруг, з якими студент має справу при виконанні експериментів на стендах УИЛС-1, не становлять небезпеки для життя людини. Всі джерела живлення забезпечені захистом від перевантажень. Тому складання, перевірку і вмикання електричних кіл студенти проводять самостійно. Однак з огляду на те, що все обладнання лабораторії, в тому числі стенди і вимірювальні прилади, під'єднані до мережі 220/127 В, варто дотримуватися певних правил безпеки.

Під час роботи в лабораторії забороняється:

- торкатися до труб опалювальної системи;
- самостійно включати вилки вимірювальних приладів у мережу;
- відключати заземлення вимірювальних приладів;
- виймати блоки стенда;
- залишати без нагляду включений стенд і вимірювальні прилади;
- залишати лабораторію без дозволу викладача.

У разі пошкодження блоків стенда, елементів або вимірювальних приладів слід негайно відключити їх від мережі живлення і сповістити про це викладача. По закінченню роботи на стенді необхідно виключити живлення всіх активних блоків стенда і вимірювальних приладів.

Роботу в лабораторії проводять відповідно до планів аудиторних занять. Звичайно лабораторна робота триває 2, 4 або 6 аудиторних годин. За цей час студент повинен виконати роботу, оформити звіт, вирішити задачу і відповісти на теоретичні питання за темою роботи, тобто захистити роботу.

Під час першого заняття студенти формують бригади у кількості від трьох до чотирьох чоловік. За бригадою до кінця навчального року закріплюється робочий стенд, номер якого і є номером комплексу елементів набірного стенду та номером варіанту за цими методичними вказівками.

Усі лабораторні роботи студенти виконують на універсальних навчально-дослідницьких лабораторних стендах УІЛС-1. Кожна робота має кілька етапів, а саме: підготовку, виконання експерименту, обробку даних і оформлення звіту, захист роботи. У розділі «Загальні відомості» кожної лабораторної роботи студенти знайдуть необхідні положення з теорії електричних кіл за відповідною тематикою роботи.

Під час виконання лабораторних робіт використовуються елементи набірного поля стенду, порядкові номери і зразкові параметри яких наведені в додатку А. Перед тим як приступити до виконання роботи студент отримує допуск, який свідчить про те, що він підготовлений до занять (вивчив теоретичний матеріал, підготував чернетку, зробив необхідні попередні розрахунки). Експериментальні дані, занесені в чернетку, наприкінці кожного експерименту показують викладачеві. У разі невірних результатів експерименти повторюють.

До захисту роботи допускається студент, який виконав і оформив звіт про лабораторну роботу у повному обсязі. Під час захисту студент повинен вирішити задачу за темою лабораторної роботи і відповісти на контрольні запитання викладача, перелік яких наведено наприкінці кожної роботи. Звіти виконують в учнівських

зошитах або на аркушах формату А4. Текст звітів повинен бути написаний чітко й акуратно. Електричні схеми та графічну частину робіт, до якої входять графіки залежностей та діаграми, що є результатами дослідів або обчислень, необхідно виконувати згідно з вимогами. Загальне оформлення пояснювальної записки – згідно з ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки й техніки.

Звіт про кожен лабораторну роботу повинен містити:

- назву роботи;
- мету роботи;
- перелік приладів, обладнання і елементів;
- назву першого експерименту, схему досліджуваного кола; результати дослідження за першим експериментом (таблиці, графіки, розрахункові формули й обчислення);
- назву другого експерименту і т. ін. (див. попередні пункти);
- висновки.

Оформлення кожної роботи повинно починатися з нової сторінки (якщо звіти виконують в учнівських зошитах). Звичайно, можливе виконання звітів в електронному вигляді з обов'язковим дотриманням таких вимог: шрифт Times New Roman, розмір 14, інтервал 1,5. При цьому студент повинен володіти навичками використання редактора формул, графічних редакторів. Після захисту останньої роботи студент повинен здати зошит, або усі окремі звіти, виконанні на аркушах формату А4, викладачеві.

Літерні позначення основних електричних величин і їхніх одиниць наведені в додатку Б.

Зразок титульного аркуша для звітів наведений в додатку В.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Мета роботи

Метою виконання першої лабораторної роботи є експериментальна перевірка графоаналітичного методу розрахунку нелінійних кіл постійного струму.

1.2 Обладнання і прилади

У якості обладнання та приладів використовують:

- універсальний навчально-дослідницький лабораторний стенд УІЛС-1 (блок постійної напруги);
- елементи набірної плати стенду;
- амперметр Щ4300, Щ4313;
- мультиметр ВЛ-11.

1.3 Підготовчий етап лабораторної роботи

Результатом підготовчого етапу є:

- вивчення теоретичного матеріалу, що пов'язаний з темами «Нелінійні електричні кола постійного струму. Загальна характеристика нелінійних кіл та методів їх розрахунку» ([1] – с. 404-416, [2] – с. 386-429);
- набуття навичок з проведення розрахунку нелінійних кіл постійного струму.

1.4 Загальні відомості

Лінійні електричні кола містять лише лінійні елементи, для яких залежності між напругами, струмами, зарядами, магнітними потоками (потокозчепленнями) виражаються лінійними функціями:

$$u = R \cdot i, \psi = L \cdot i, q = C \cdot u, \quad (1.1)$$

де $u = R \cdot i$ – вольт-амперна характеристика;

$\psi = L \cdot i$ – вебер-амперна характеристика;

$q = C \cdot u$ – кулон-вольтна характеристика.

Нелінійні електричні кола містять хоча б один нелінійний елемент (НЕ), який не може бути охарактеризований за допомогою постійних коефіцієнтів. У цьому випадку залежності (1.1) набувають вигляду:

$$u = f\left(i, \frac{di}{dt}\right), \psi = f\left(i, \frac{di}{dt}\right), q = f\left(u, \frac{du}{dt}\right). \quad (1.2)$$

Тобто, в загальному випадку, спостерігається залежність не тільки від змінної, але й від швидкості її зміни.

Нелінійні елементи поділяють на нелінійні опори, нелінійну індуктивність і ємності. При постійних струмах у якості нелінійних елементів можуть розглядатися лише нелінійні резистивні елементи.

Розрахунок нелінійних кіл постійного струму проводять графоаналітичним методом, для чого ВАХ елементів повинні бути заданими у вигляді графіків або аналітичними виразами. Полягає розрахунок в побудові результуючих ВАХ.

З методів, які розглядалися раніше, для розрахунку нелінійних кіл постійного струму застосовують метод двох вузлів; заміну декількох паралельно з'єднаних

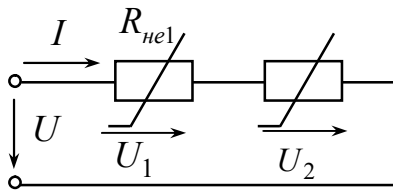


Рисунок 1.1 – Послідовне з'єднання нелінійних елементів

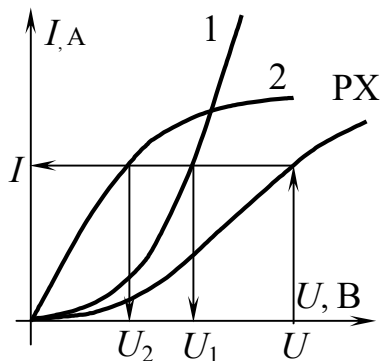


Рисунок 1.2 – ВАХ послідовного з'єднання

віток однією еквівалентною; метод еквівалентного генератора.

При послідовному з'єднанні (рис 1.1) розрахунок базується на другому законі Кірхгофа: $U = U_1 + U_2$. Один з параметрів, а саме напруга на вході кола U або струм I , повинен бути заданим для визначення струму I (або напруги U), а також напруг на елементах U_1 і U_2 . Оскільки з'єднання послідовне, то загальним параметром є струм. Довільно задаємося різними значеннями струму і додаємо напруги на нелінійних елементах при кожному конкретному значенні струму, тобто будуємо результуючу ВАХ (PX) – рисунок 1.2.

Розглянемо окремий випадок, коли послідовно з'єднані активний опір і нелінійний елемент. Тоді немає необхідності будувати результуючу характеристику $I = f(U_{HE} + I \cdot R)$. У

цьому випадку розглядають рівняння $E = I \cdot R + U_{HE}$ в режимі холостого ходу

($I = 0, U_{HE} = E$) і в режимі короткого замикання ($U_{HE} = 0, I = \frac{E}{R}$). Потім будують

пряму, що сполучає точки з координатами $(E, 0)$, $(0, \frac{E}{R})$ і перетинає ВАХ нелінійного елемента – рисунок 1.3, а. Точка, що визначає струм $I - n$.

Також в цьому випадку можна застосувати і наступний спосіб (рис. 1.3, б):

- побудувати ВАХ лінійного елемента за двома точками;
- відкласти значення ЕРС E ;

- з точки з координатами $(E/2; 0)$ побудувати перпендикуляр до його перетину з ВАХ лінійного елементу (точка m);
- провести допоміжну пряму через точки E і m , яка перетне ВАХ нелінійного елементу (рис. 1.3, б), n – точка, що визначає струм I .

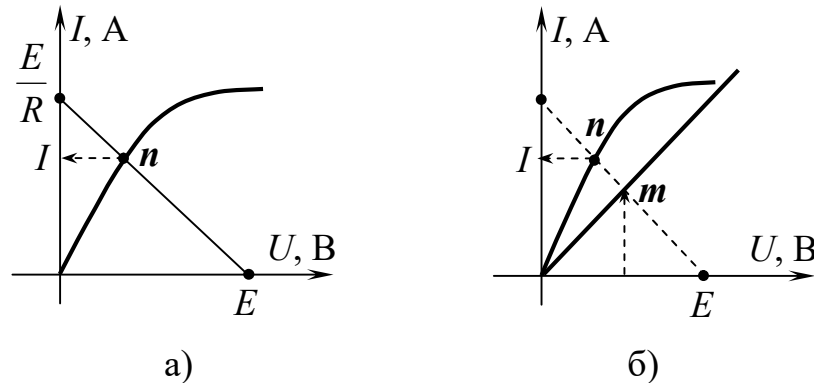


Рисунок 1.3 – Два способи графоаналітичного розрахунку при послідовнім з’єднанні активного опору і нелінійного елементу

При паралельному з’єднанні елементів (рис. 1.4) загальним параметром є напруга. Якщо при розрахунку задана вхідна напруга U , а струми в паралельних вітках невідомі, то за напругою на вході кола U визначають струми I_1 , I_2 нелінійних елементів за їх ВАХ, а потім за першим законом Кірхгофа розраховують загальний струм – $I = I_1 + I_2$.

Якщо був заданий струм I , то необхідно будувати результуючу характеристику $U = f(I_1 + I_2) = f(I)$ за першим законом Кірхгофа, а саме $I = I_1 + I_2$ (рис. 1.5).

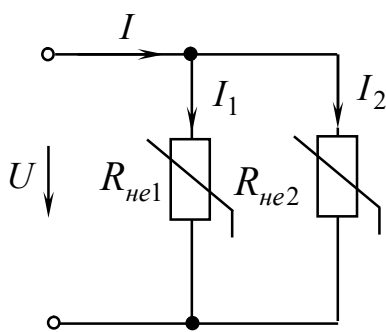


Рисунок 1.4 – Паралельне з’єднання двох нелінійних елементів

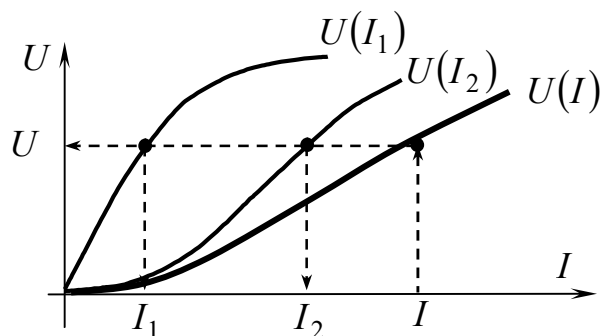


Рисунок 1.5 – Графоаналітичний розрахунок при паралельному з’єднанні двох нелінійних елементів

Розрахунок змішаного з’єднання нелінійних елементів містить етапи розрахунку кіл з паралельним і послідовним з’єднанням елементів (рис. 1.6, а). Після заміни двох паралельно з’єднаних нелінійних елементів «2» і «3» одним еквівале-

нтийм нелінійним опором «2-3» (результуюча характеристика будується за правилами отримання результуючої ВАХ паралельно з'єднаних елементів) одержуємо послідовне з'єднання елементів «1» і «2-3» – схема на рисунку 1.6, б.

Подальший розрахунок, якщо задана напруга U , проводимо так:

- будемо результуючу ВАХ послідовно з'єднаних елементів «1» і умовного нелінійного елемента «2-3», тобто маємо на увазі схему на рисунку 1.6, в;
- визначаємо струм I_1 , а також напруги на першому нелінійному елементі U_1 та на паралельних вітках U_{23} ;
- за напругою U_{23} і заданими ВАХ елементів «2» і «3» визначаємо струми I_2 і I_3 .

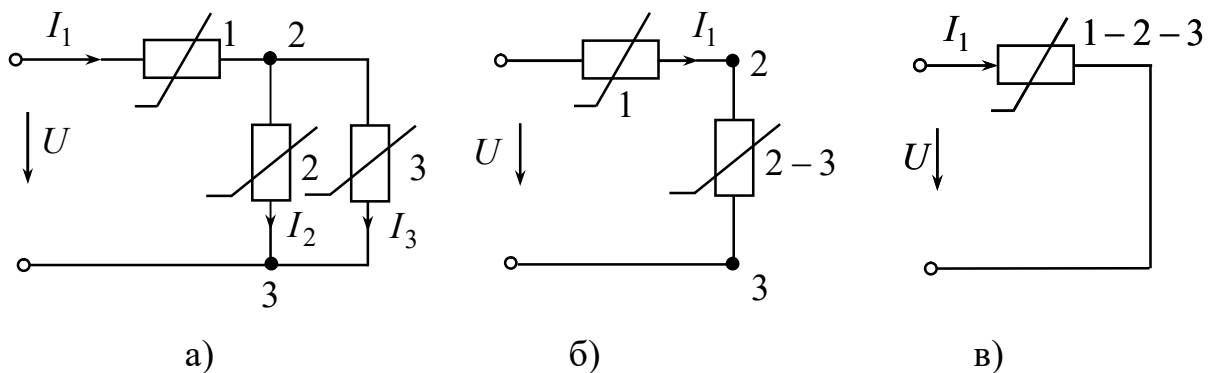


Рисунок 1.6 – Етапи графоаналітичного розрахунку змішаного з'єднання нелінійних елементів

1.5 Порядок виконання роботи

Схеми треба складати таким чином, щоб мати змогу провести виміри (де це потрібно). Робота не потребує попередніх розрахунків. Для виконання роботи кожний студент повинен мати міліметровий папір (2 листа розміром А4).

1. Зняття та побудування вольт-амперних характеристик (ВАХ) нелінійних елементів (лампа розжарювання та діод) та лінійного елемента R_d

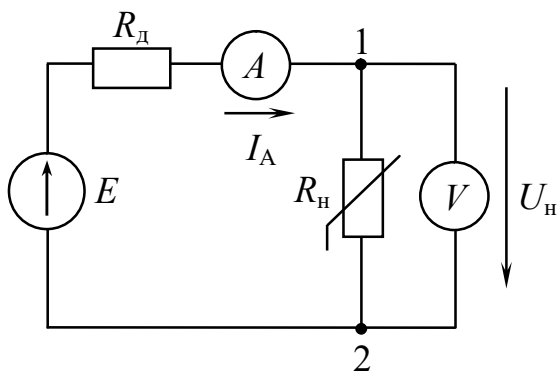


Рисунок 1.7 –
Електричне
коло для зняття ВАХ

Зібрати електричне коло (рис. 1.7). У якості джерела E використати регульоване джерело постійної напруги. Нелінійні елементи, що видаються викладачем, та лінійний опір R_d ставлять на місце R_n . Опори R_d та R_n для всіх варіантів – це лінійні опори R02 та R03 з елементів набірного поля.

Плавно змінюючи значення напруги джерела ЕРС E , встановлювати струм у колі з кроком 10 мА в діапазоні від 0 до 100 мА та

вимірювати при кожному значенні струму напругу на елементі. Результати розрахунків та експериментів занести до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Дані для побудови ВАХ

$I, \text{ мА}$	$U, \text{ В}$		
	Діод VD	лампа розжарювання	лінійний опір $R03$
0			√
10			—
20			—
30			—
40			—
50			—
60			—
70			√
80			—
90			—
100			—

2. Дослідження послідовного з'єднання нелінійного та лінійного елементів

Зібрати електричне коло (рис. 1.8). У якості нелінійного елементу взяти лампу розжарювання (R_1 на схемі), у якості лінійного елемента резистор $R03$ (R_2 на схемі). Встановити вхідну напругу $U_{\text{вх}}$ за вказівкою викладача в діапазоні від 4 до 10 В. Виміряти значення струму та напруг на елементах. Результати експерименту занести до таблиці 1.2.

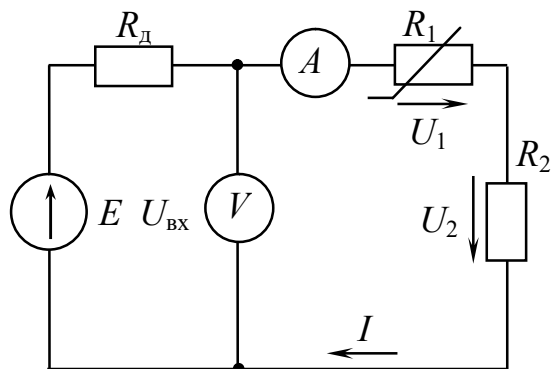


Рисунок 1.8 – Послідовне з'єднання нелінійних елементів

Таблиця 1.2 – Результати експерименту та розрахунку (рис 1.8)

Визначено	$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$
експериментом				
розрахунком				

3. Дослідження паралельного з'єднання нелінійного та лінійного елементів

Зібрати електричне коло (рис. 1.9). У якості нелінійного елемента взяти лампу розжарювання (R_1 на схемі), у якості лінійного елемента – резистор R_03 (R_2 на схемі). Встановити вхідний струм I за вказівкою викладача в діапазоні від 50 до 90 мА. Виміряти значення струмів I_1 , I_2 та напругу $U_{\text{вх.}}$ на паралельно з'єднаних елементах. Результати експерименту занести до таблиці 1.3.

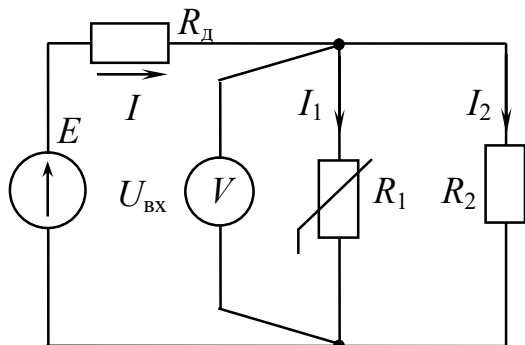


Рисунок 1.9 – Паралельне з'єднання нелінійних елементів

Таблиця 1.3 – Результати експерименту та розрахунку (рис.1.9)

Визначено	I , мА	$U_{\text{вх.}}$, В	I_1 , мА	I_2 , мА
експериментом				
розрахунком				

4. Дослідження змішаного з'єднання нелінійних елементів

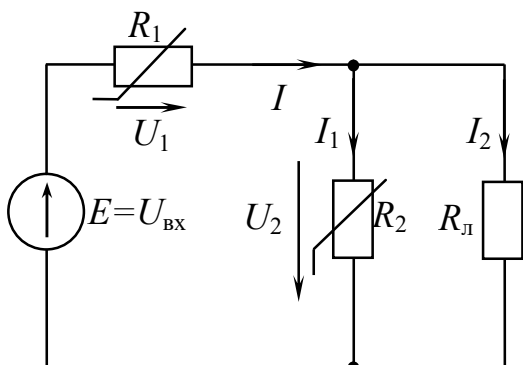


Рисунок 1.10 – Змішане з'єднання нелінійних елементів

Зібрати електричне коло (рис. 1.10). У якості нелінійних елементів R_1 , R_2 взяти відповідно діод і лампу розжарювання, у якості лінійного елемента – резистор R_03 (R_3 на схемі). Встановити вхідну напругу $U_{\text{вх}}$ за вказівкою викладача в діапазоні від 5 до 8 В. Виміряти значення струмів I , I_1 , I_2 і напругу на елементах U_1 (напруга на діоді), U_2 (напруга на паралельних вітках). Результати експерименту занести до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Результати експерименту та розрахунку (рис. 1.10)

Визначено	$U_{\text{вх.}}$, В	U_1 , В	U_2 , В	I , мА	I_1 , мА	I_2 , мА
експериментом						
розрахунком						

1.6 Обробка експериментальних даних

1. За даними експерименту 1 на міліметровому папері (перший аркуш) побудувати ВАХ лампи розжарювання та лінійного елемента $R03$ у одній системі координат. Рекомендується вибрати такі масштаби: за напругою – $m_U = 0,5$ В/см (вісь абсцис), за струмом – $m_I = 5$ мА/см (вісь ординат). Зробити графоаналітичним методом розрахунок послідовного з'єднання нелінійного і лінійного елементів, тобто визначити значення струму I та напруг U_1 та U_2 на елементах. Для цього на першому аркуші скласти ВАХ лампи розжарювання та лінійного елемента, як потрібно для послідовного з'єднання. Порівняти отримані результати з даними експерименту 2 і занести їх до таблиці 1.2.

2. Зробити графоаналітичним методом розрахунок паралельного з'єднання нелінійного і лінійного елементів, тобто визначити значення струмів I_1 , I_2 та напруги $U_{\text{вх}}$ на паралельних вітках. Для цього на першому аркуші скласти ВАХ лампи розжарювання та лінійного елемента, як потрібно для паралельного з'єднання. Порівняти отримані результати з даними експерименту 3 і занести їх до таблиці 1.3.

3. За даними експерименту 1 на другому аркуші побудувати ВАХ лампи розжарювання, діода та лінійного елемента $R03$. Зробити графоаналітичним методом розрахунок змішаного з'єднання нелінійних та лінійного елементів, тобто визначити значення струмів I , I_1 , I_2 та напруг U_1 , U_2 . Для цього спочатку скласти ВАХ лампи розжарювання і лінійного елемента $R03$, як це потрібно для паралельного з'єднання, а потім отриману результуючу характеристику скласти з характеристикою діода, як це потрібно для послідовного з'єднання. Порівняти отримані результати з даними експерименту 4 та занести їх до таблиці 1.4.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення та наведіть основні властивості нелінійних електричних кіл постійного струму.

2. Які особливості характеризують розрахунок нелінійних кіл у порівнянні з лінійними?

3. Поясніть, як проводять розрахунок нелінійних кіл при послідовному, паралельному та змішаному з'єднанні нелінійних елементів.

4. Дайте визначення статичного та диференційного опорів нелінійних елементів.

7. Поясніть, як проводять заміну нелінійного елемента лінійним опором та EPC .

8. Наведіть приклади практичного застосування HE постійного струму.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1 Мета роботи

Метою виконання другої лабораторної роботи є:

- отримати експериментальні дані для побудови вольт-амперних характеристик напівпровідного діода і стабілітрона;
- побудувати вольт-амперні характеристики та знайти за ними статичні і динамічні опори діода і стабілітрона;
- виміряти та розрахувати амплітуди, середні та діючі значення напруг в колах змінного струму;
- проаналізувати електромагнітні процеси в колах змінного струму;
- знайти значення нульової, першої і другої гармонік несинусоїдної напруги.

2.2 Обладнання і прилади

У якості обладнання та приладів використовують:

- універсальний навчально-дослідницький лабораторний стенд УИЛС-1;
- мультиметр ВЛ-11;
- прибор комбінований цифровий Щ4300 або Щ4313;
- вольтметр магнітоелектричної системи М109;
- вольтметр електромагнітної системи Э59;
- цифровий осцилограф SDS 1022 DL;
- елементи набірної поля стенду.

2.3 Підготовчий етап лабораторної роботи:

Результатом підготовчого етапу є:

- вивчення теоретичного матеріалу ([1] – с. 449-461, 492-509; [2] – с. 430-432, 458-464);
- набуття навичок експериментального дослідження нелінійних кіл змінного струму.

2.4 Загальні відомості

Відомо, що електричне коло буде нелінійним в випадку, якщо в його склад входять один або декілька нелінійних елементів (HE), що мають відповідні нелінійні залежності $u = f(i)$, $\psi = f(i)$, $q = f(u)$. Характеристики HE , що одержані експериментально, мають вигляд таблиць, за якими можна побудувати криві, які, в свою чергу, апроксимуються аналітичними виразами.

Використання нелінійних елементів дозволяє отримувати нові різновиди електронних пристроїв, наприклад такі пристрої, що генерують синусоїдні та несинусоїдні коливання різних частот, форм та потужностей, перетворюють змінну напругу в постійну і навпаки та інше.

Властивості *HE* можуть бути описані за допомогою його ВАХ, а також статичними і диференційними опором.

Під статичним опором нелінійного елемента розуміють відношення напруги на нелінійному елементі до струму в ньому в будь-якій точці ВАХ цього елемента

(рис. 2.1):

$$R_{cm} = \frac{U}{I} = m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.1)$$

де $m_R = \frac{m_U}{m_i}$ – масштаб за опором.

Статичний опір (R_{cm}) характеризує поведінку *HE* в режимі постійного струму. При переході від однієї точки ВАХ до іншої величина R_{cm} змінюється.

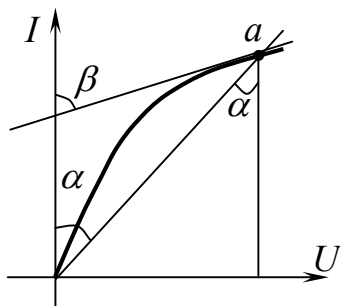


Рисунок 2.1 –
Визначення
 R_{cm} та R_D

Під диференційним опором (R_D) розуміють ве-

личину $R_D = \frac{dU}{dI}$, яка характеризує нелінійний елемент при малих відхиленнях від даної точки нелінійної характеристики (рис. 2.1):

$$R_D = m_R \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (2.2)$$

Діод і стабілітрон, як елемент електричного кола, при роботі в області низьких частот представляють собою нелінійні опори, що мають несиметричні однозначні характеристики. Активний опір цих елементів залежить від значення напруги на їх виводах та її полярності. Напруга, при якій діод має незначний опір називається прямою або провідною, протилежна напруга, при якій опір цього елемента великий (може досягти 10^6 Ом), називається зворотною або непровідною. Відповідно струм, що проходить по цих елементах залежить від полярності прикладеної напруги. ВАХ діода і стабілітрона, тобто полярність підключення визначає їх поведінку в колах змінного струму.

На рисунку 2.2 приведені умовне позначення діода та показана його вольтамперна характеристика. На вольтамперній характеристиці діода розрізняють дві вітки (пряму 0–1–2, що знаходиться в першій чверті та зворотну 0–3–4–5), які зручно будувати в різних масштабах. Для оцінки цих масштабів відзначимо, що відношення прямого і зворотного струму сягає $10^3 \div 10^5$, а відношення прямої і зворотної напруг – $10^2 \div 10^3$. Як бачимо з рисунку 2.2, пряма гілка вольтамперної

характеристики 0–2 має дві характерні ланки. Ланка 0–1 характеризується відносно високим опором. В тому випадку, якщо пряма напруга U_{np} стає більшою значення U_H , ВАХ діоду переходить на ланку 1-2 (малий опір). Зворотна гілка 0–5 також має дві ланки: 0–3 та 3–4–5. Якщо зворотна напруга між анодом та катодом

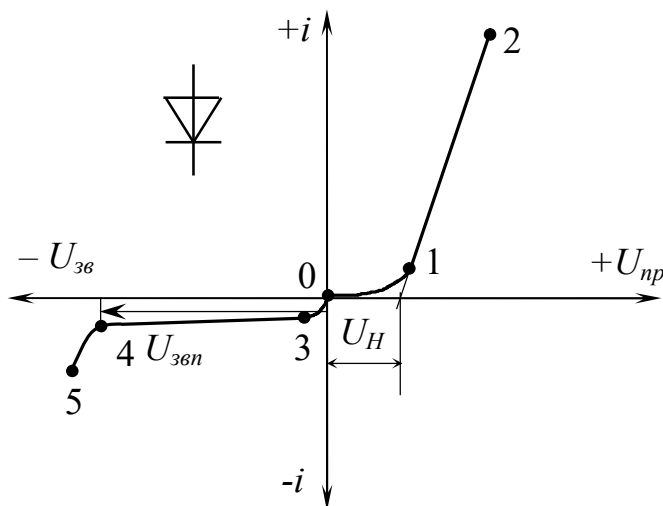


Рисунок 2.2 – ВАХ діоду

стає більшою значення U_{zep} , то настає пробій p - n переходу і діод виходить з ладу.

Діоди мають широкий спектр застосування в електротехніці, перетворювальній техніці та радіотехніці. Наприклад, на їх основі виконують випрямляючі пристрої, які перетворюють змінний струм в постійний, при чому значення випрямленого струму може сягати 10^4 А.

Разом з діодами широке застосування знайшли стабілітрони та двохсторонні обмежувачі. Вольт-амперна характеристика стабілітрона показана на рисунку 2.3.

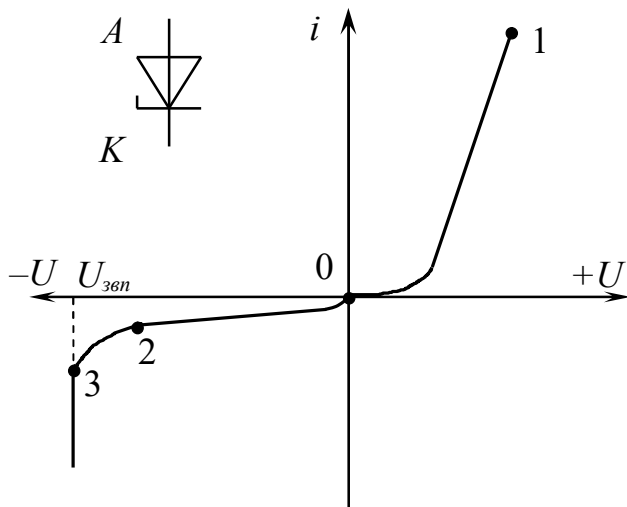


Рисунок 2.3 – ВАХ стабілітрону

Гілка 0–1 не відрізняється від прямої гілки звичайного діода, але зворотна 0–2–3 значно відмінна. В точці 2 при дії зворотної напруги пробою U_{zep} настає лавинний пробій p - n переходу з різким зростанням зворотного струму. Щоб запобігти виходу із строю стабілітрона, його конструкція забезпечує ефективне відведення тепла, тобто пробій проходить по всій поверхні p - n переходу і потужність, яка виділяється, не перевищує допустиму.

Для повної характеристики роботи приладів в колах змінного струму розглянемо кількісні відношення, які зв'язують напруги та струм. Прийнято всі напруги (струми) зв'язувати з двома базисними значеннями: ефективним (діючим) значенням вхідної напруги, що діє на вході, та діючим (або середнім) значенням напруги на виході.

Розглянемо схему з послідовним з'єднанням синусоїдної ЕРС $e(t)$, діода $VD1$ та лінійного резистора R_H , що показана на рисунку 2.4. Це – однофазний

однопівперіодний випрямляч.

Середнє значення напруги на резисторі R_H та струму через резистор:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin \omega t d\omega t = \frac{U_2}{\pi} \cdot \sqrt{2} = \frac{U_m}{\pi}; \quad (2.3)$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_H} = \frac{I_m}{\pi}, \quad (2.4)$$

де U_2 – діюче значення напруги на вході;

I_m – максимальне значення струму через діод;

ω – кутова частота.

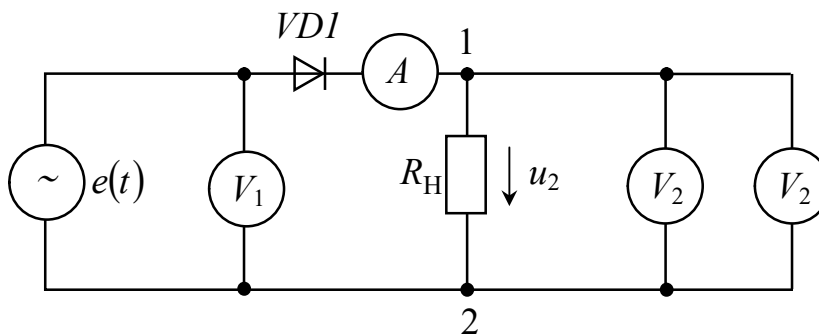


Рисунок 2.4 – Досліджувана схема
однофазного однопівперіодного випрямляча

Діюче значення струму дорівнює

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{2} = \frac{1}{2} \cdot \overbrace{\pi \cdot I_d}^{I_m} = \frac{\pi}{2} \cdot I_d. \quad (2.5)$$

Часова діаграма роботи діода приведена на рисунку 2.5.

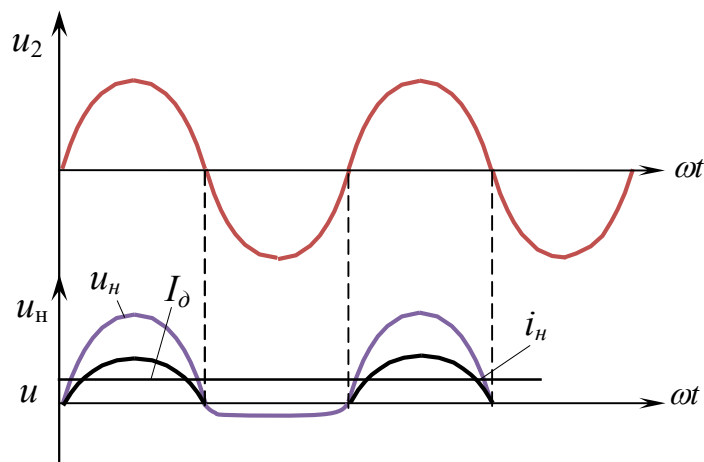


Рисунок 2.5 – Часові діаграми роботи
діодів в схемі однофазного
однопівперіодного випрямляча

Вихідна напруга u_n представляє собою періодичні напівсинусоїдні імпульси, які можна представити рядом Фур'є (наведений в довіднику):

$$u_n(t) = \frac{U_{2m}}{\pi} \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot \cos \omega t + \frac{2}{3} \cdot \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cdot \cos 4\omega t + \frac{2}{35} \cdot \cos 6\omega t - \dots \right). \quad (2.6)$$

2.5 Порядок виконання роботи

1. Дослідження вольт-амперних характеристик напівпровідникового діода та стабілітрона

Ознайомитись з робочим місцем, вимірювальними приладами та технічними характеристиками нелінійних елементів, у якості яких використовують діод КД202В та стабілітрон Д815Б.

Основними параметрами діода КД202В є:

- середнє значення випрямленого струму $I_{np}=3,5\text{ А}$;
- пряме падіння напруги $U_{np}=1\text{ В}$, тобто напруга на діоді при граничному прямому струмі I_{np} , для діодів з кремнію становить $(0,6 \div 0,8)\text{ В}$;
- максимально допустима зворотна напруга $U_{звmax}=100\text{ В}$, що дорівнює максимально допустимому амплітудному значенню зворотної напруги, яке не призводить до виходу з ладу приладу за визначених умов охолодження.

Основними параметрами стабілітрону Д815Б є:

- напруга стабілізації $U_{ст}=5,7 \div 7,5\text{ В}$;

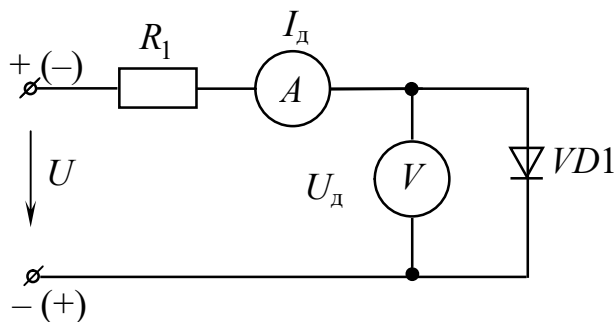


Рисунок 2.6 – Досліджувана схема для зняття ВАХ діода КД202В

- максимальний струм стабілізації $I_{стmax}=80\text{ мА}$.

На набірному полі стенда УИЛС-1 зібрати електричну схему, що приведена на рисунку 2.6. для зняття ВАХ діода та ВАХ стабілітрону.

Як джерело постійної напруги використати регульоване джерело з блоку постійної напруги стенду

УИЛС-1. Для обмеження струму через діод використати резистор $R03$ з елементів набірної плати (R_1 на схемі), а в модуль із стабілітроном вже вбудовано резистор, що обмежує струм. Встановити межі виміру на приладах: на амперметрі Щ4300 (Щ4313) – 200 мА, на вольтметрі (мультиметр ВЛ-11) – 2 В та перевести їх в режим вимірювання постійного струму на напруги.

Примітка: звернутися до викладача щодо особливості підключення блоку із стабілітроном (рис. 2.7).

Для зняття даних для побудови прямих гілок ВАХ діоду та стабілітрону підключити джерело з полярністю, вказаній на схемі без дужок. Плавню змінюючи значення напруги джерела ЕРС E встановлювати струм у колі в діапазоні від 0 до 150 мА. Результати експерименту занести до таблиці 2.1.

Для зняття даних для побудови зворотних гілок ВАХ діоду та стабілітрону змінити полярність живлення (на схемі рисунку 2.6 показана в дужках) та підключення вимірювальних приладів. Плавню змінюючи значення напруги джерела ЕРС E , встановлювати струм у колі в діапазоні від 0 до 25 мА. Результати експерименту занести до таблиці 2.2. Треба відзначити, що зняти зворотну гілку ВАХ діода не уявляється можливим через те, що він має великий опір при зворотнім підключенні і напруга на ньому практично дорівнює вхідній напрузі.

Таблиця 2.1 – Результати експерименту, прямі гілки ВАХ

I , мА	0	0,5	10	15	20	50	75	100	150
U_d , В (діод)									
U_d , В (стабілітрон)									

Таблиця 2.2 – Результати експерименту, зворотна гілка стабілітрона

I , мА	0	2	5	10	15	20	24	25
U_d , В (стабілітрон)								

2. Дослідження нелінійних елементів в колах змінного струму

Зібрати електричну схему дослідження діода в колі змінного струму, що показана на рисунку 2.4.

Як джерело змінної напруги використати фазу А з блоку трифазних напруг стенду УИЛС-1. Переключити прилад Щ4313 (або Щ4300) в режим виміру змінного струму, встановити межу 200 мА і використати його як амперметр A_1 . Мультиметр ВР-11 перевести в режим виміру змінної напруги з межею виміру 200 В і використати його як вольтметр V_1 . Вольтметр V_2 повинен бути електромагнітної системи типу Э59 з межею виміру 30 В, а вольтметр V_3 – магнітоелектричної системи М109 з межею виміру 3 В. Вольтметри V_2 , V_3 підключають паралельно резистору R_H , у якості якого взяти резистор R06 з елементів набірної поля. Також

до клем «1» та «2» підключають вхід двохпроменевого цифрового осцилографа SDS 1022 DL для виміру максимальної напруги та періоду.

Змінюючи і контролюючи вхідну напругу за допомогою перемикачів блоку змінної напруги провести виміри та записати результати в таблицю 2.3.

Примітка: у якості вольтметра V_2 також можна використовувати мультиметр ВР-11, якщо перенести його з входу до клем «1» та «2».

Таблиця 2.3 – Результати експерименту, схема з діодом

$U_{\text{вх}}, B$	5	10	15	18	20	25	30
I, mA							
U_2, B							
$U_{2\text{ср}}, B$							
$U_{2\text{max}}, B$							

Виключити блок трифазних напруг. Зібрати схему рисунку 2.7 із стабілітроном та провести аналогічні пункту 2. виміри. Результати експерименту занести до таблиці 2.4. Примітка: звернутися до викладача щодо особливості підключення блоку із стабілітроном.

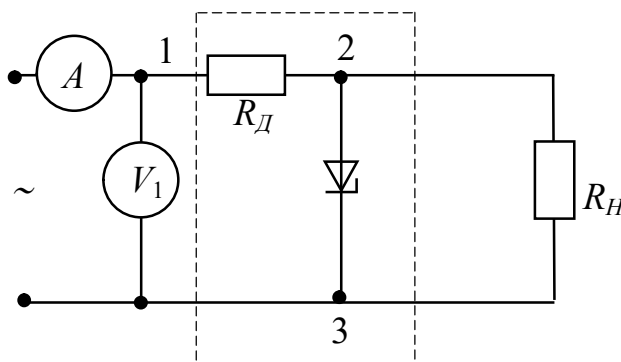


Рисунок 2.7 – Схема дослідження стабілітрону в колі змінного струму

Виключити блок трьохфазних напруг. Замінити стабілітрон зустрічно-послідовним з'єднанням двох стабілітронів (рис. 2.8). Включити змінну напругу і результати занести в таблицю 2.5.

Примітка: звернутися до викладача щодо особливості підключення блоку із зустрічно включеними стабілітронами.

Таблиця 2.4 – Результати експерименту, схема із стабілітроном

U_{BX}, B	23	24	25	26	27	28	29	30
I, mA								
U_2, B								
$U_{2\text{сep}}, B$								
$U_{2\text{max}}, B$								

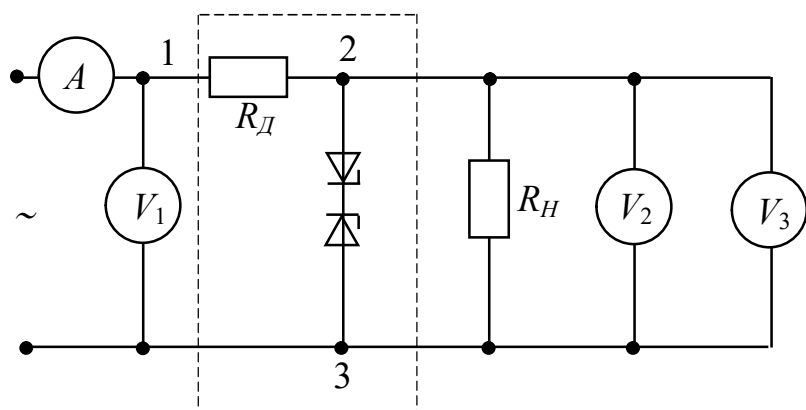


Рисунок 2.8 – Схема для дослідження зустрічно включених стабілітронів

Таблиця 2.5 – Результати експерименту, схема з зустрічно включеними стабілітронами

U_{BX}, B	23	24	25	26	27	28	29	30
I, mA								
U_2, B								
$U_{2\text{сep}}, B$								
$U_{2\text{max}}, B$	$U_{2\text{maxв}}$							
	$U_{2\text{maxн}}$							

2.6 Обробка експериментальних даних

1. За результатами дослідних даних (табл. 2.1, 2.2) побудувати вольт-амперні характеристики діода та стабілітрона.
2. За побудованими ВАХ діода та стабілітрона визначити статичний та динамічний опір для вказаної викладачем точки.
3. За результатами дослідних даних (табл. 2.3) записати ряд Фур'є $u_n(t)$ для напруги на резисторі R_n , – п'ять членів ряду.
4. За результатами дослідних даних (табл. 2.3, 2.4, 2.5) побудувати графіки залежності $I(U_{вх})$; $U_{сер}(U_{вх})$; $U(U_{вх})$, $U_{2m}(U_2)$.
5. За результатами проведеної лабораторної роботи зробити висновки про властивості нелінійних елементів в колах змінної напруги.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте роботу діода і стабілітрона в колах змінного струму.
2. Поясніть, як за ВАХ діода та стабілітрона знайти статичні і динамічні параметри.
3. Наведіть деякі загальні властивості нелінійних елементів при змінному струмі.
4. В яких випадках в колах змінного струму з'являються гармонійні складові?
5. В яких колах змінного струму з'являються нульові гармоніки?
6. Поясніть, як здійснюють апроксимацію нелінійних ВАХ графоаналітичним методом трьох ординат при розрахунку нелінійних кіл змінного струму.
7. Поясніть, як здійснюють апроксимацію нелінійних ВАХ ступеневим поліномом.
8. Поясніть, як здійснюють кусково-лінійну апроксимацію нелінійних ВАХ.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ СИМЕТРИЧНОГО ЧОТИРИПОЛЮСНИКА ТА ЛІНІЇ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

3.1 Мета роботи

Метою виконання третьої лабораторної роботи є:

- знаходження коефіцієнтів A, B, C, D симетричного Т-подібного чотириполюсника (Ч);
- перевірка основного співвідношення, що пов'язує коефіцієнти Ч;
- знаходження опорів Ч в режимі холостого ходу та короткого замикання;
- знаходження та експериментальна перевірка значень напруги U_1 , та струму I_1 на вході чотириполюсника при відомих частоті джерела на вході, струмі I_2 на виході та навантаженні, що під'єднане до вихідних затискачів;
- знаходження хвильового опору $Z_{xв}$ елементів довгої лінії;
- знаходження $th(\gamma n)$, γ , α , β при $n = 1$ елементів довгої лінії;
- дослідження лінії з розподіленими параметрами, що складається з трьох послідовно з'єднаних Т-подібних чотириполюсників при $Z_H = Z_{xв}$, $Z_H = \infty$, $Z_H = 0$.

3.2 Обладнання і прилади:

У якості обладнання та приладів використовують:

- універсальний навчально-дослідний лабораторний стенд УИЛС-1;
- лабораторний макет лінії з розподіленими параметрами;
- елементи набірної плати стенду;
- прибор комбінований цифровий Щ4300 або Щ4313;
- мультиметр ВЛ-11;
- цифровий осцилограф SDS 1022 DL.

3.3 Підготовчий етап лабораторної роботи:

Результатом підготовчого етапу є:

- вивчення теоретичного матеріалу ([1] – с. 350-369, 492-509; [2] – с. 344-354);
- набуття навичок експериментального та теоретичного дослідження лінії з розподіленими параметрами (довгої).

3.4 Загальні відомості

Чотириполюсник – частина електричного кола, що має два вхідних і два вихідних затискачі, він – передаточна ланка між джерелом живлення і навантаженням (рис. 3.1).

Якщо чотириполосник не має у своєму складі джерел енергії, то його називають пасивним (рис. 3.1).

На рисунку позначено: 1, 1' – вхідні затискачі, до яких під'єднують джерело живлення $e(t)$; 2, 2' – вихідні затискачі, до яких під'єднують навантаження Z_H . $\underline{I}_1$, $\underline{U}_1$ – вхідні напруга та струм; $\underline{I}_2$, $\underline{U}_2$ – вихідні напруга та струм.

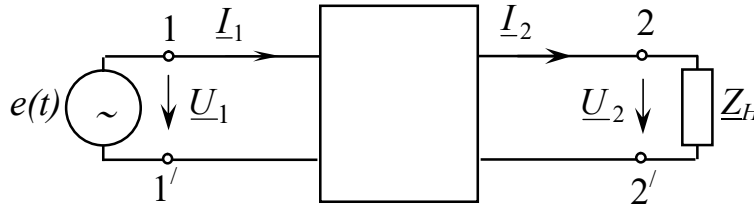


Рисунок 3.1 – Структурна схема чотириполосника

Найбільш простим чотириполосником є дводротова лінія передачі енергії. Також прикладами чотириполосника є трансформатор, що перетворює напругу чи струм одного рівня в інший, фільтри, що пропускають струм однієї частоти і не пропускають іншої, кабелі, що з'єднують антену з телевізором.

Будь який чотириполосник, опори якого не змінюються, можна за допомогою еквівалентних перетворень привести до трьох опорів, з'єднаних зіркою або трикутником. В першому випадку це буде Т-подібний чотириполосник, який показаний на рисунку 3.2, в іншому – П-подібний чотириполосник (рис.3.3).

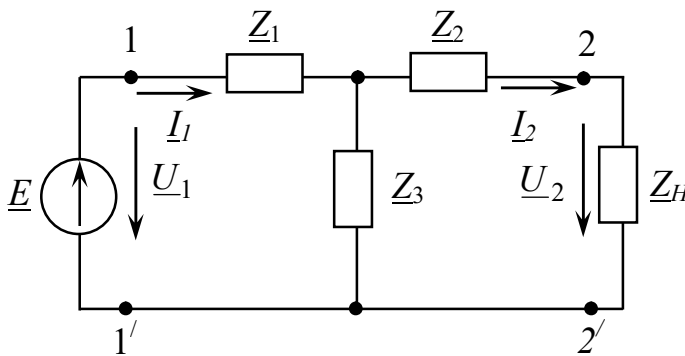


Рисунок 3.2 – Т-подібний чотириполосник

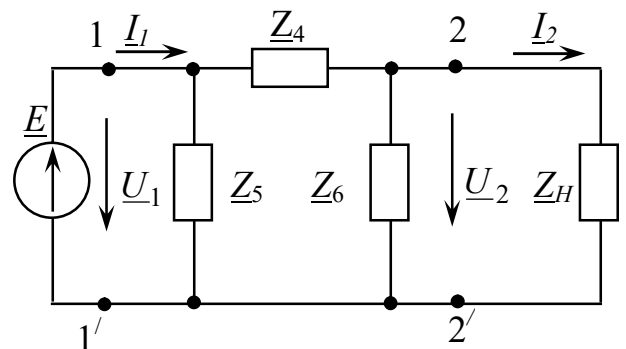


Рисунок 3.3 – П-подібний чотириполосник

Коли $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ ($\underline{Z}_5 = \underline{Z}_6$) чотириполосники називають симетричними. Знаючи величини опорів, можна знайти коефіцієнти A , B , C , D , а за допомогою коефіцієнтів – вхідні та вихідні значення напруг та струмів. Відомо, що ці коефіцієнти можна знайти експериментально, вимірюючи за допомогою амперметра і вольтметра U_1 , I_1 , U_2 , I_2 , а фазовий зсув – за допомогою двопробного електронного осцилографа SDS 1022 DL. При цьому затискачі 2–2' чотириполосника від'єднують від навантаження Z_H , створюючи режим холостого ходу, а потім їх

поєднують, створюючи режим короткого замикання. Отже для Т-подібного чотириполюсника:

$$A = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \quad (I_2 = 0), \quad (3.1)$$

$$B = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_2} \quad (U_2 = 0), \quad (3.2)$$

$$C = \frac{1}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2} \quad (I_2 = 0), \quad (3.3)$$

$$D = 1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} \quad (U_2 = 0). \quad (3.4)$$

Для П-подібного чотириполюсника:

$$A = 1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_5}; \quad B = \underline{Z}_4; \quad C = \frac{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6}{\underline{Z}_4 \cdot \underline{Z}_5 \cdot \underline{Z}_6}; \quad (3.5)$$

Після знаходження коефіцієнтів необхідно виконати перевірку, використовуючи співвідношення $A \cdot D - B \cdot C = 1$

Для будь-якого лінійного пасивного чотириполюсника існують основні рівняння, що пов'язують струм $\underline{I}_1$ і напругу $\underline{U}_1$ на вході із струмом $\underline{I}_2$ і напругою $\underline{U}_2$ на виході. А-форма запису основних рівнянь чотириполюсника:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = A \cdot \underline{U}_2 + B \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 = C \cdot \underline{U}_2 + D \cdot \underline{I}_2 \end{cases} \quad (3.6)$$

Якщо відомі значення $\underline{Z}_H$ та струму $\underline{I}_2$, то:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = A \cdot \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_H + B \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_2 (C \cdot \underline{Z}_H + D) \end{cases} \quad (3.7)$$

По відомим коефіцієнтам можна знайти вхідний опір $\underline{Z}_{вх\ xx}$ чотириполюсника в режимі холостого ходу на виході та вхідний опір $\underline{Z}_{вх\ кз}$ в режимі короткого замикання вихідних затискачів 2, 2':

$$\underline{Z}_{вх\ xx} = \frac{A}{C}; \quad \underline{Z}_{вх\ кз} = \frac{B}{D}. \quad (3.8)$$

Електричними колами (лініями) з розподіленими параметрами називають такі кола, у яких струм і напруга безперервно змінюються при переході від однієї точки (перетину) лінії до іншої, сусідньої точки. Кожен малий елемент такої лінії, наприклад дводротової, має опір і індуктивність, а між дротами – провідність і ємність. Таку лінію ще називають довгою і характеризується вона такими первинними параметрами, рівномірно розподіленими уздовж лінії:

– R_0 , активний опір одиниці довжини прямого і зворотного дротів, Ом/км;

- L_0 , індуктивність одиниці довжини петлі, утвореної прямим і зворотним дротами, Гн/км;
- G_0 , провідність на одиницю довжини між дротами, См/км;
- C_0 , ємність на одиницю довжини між дротами, Ф/км.

Активний опір та індуктивність є її поздовжніми параметрами, що обумовлені спаданням напруги в активному опорі дротів і ЕРС самоіндукції, що наводиться уздовж усієї лінії. Ємність лінії та провідність ізоляції відносять до поперечних параметрів лінії, що обумовлені ємністю між дротами (струмами зсуву) і провідністю ізоляції (струмами витоку через гірлянди ізоляторів і струмами, обумовленими коронними електричними розрядами поблизу поверхні дротів). Наявністю поперечних та поздовжніх параметрів і пояснюється те, що на різних ділянках лінії будуть різні напруги та струми. Зміна напруги уздовж лінії пов'язана з падінням напруги на активних опорах R_0 та індуктивностях L_0 , а зміна струму являється наслідком відгалуження струму через провідність та ємність.

Таким чином, лінію можна розглядати як електричне коло, що складається з ряду елементів, кожний з яких має властивості активного опору і індуктивності, а також ємності та провідності ізоляції. Якщо первинні параметри (R_0, L_0, C_0, G_0) розподіленні рівномірно по всій довжині лінії, то таку лінію називають однорідною.

При дослідженні довгих ліній їх заміняють різними електричними схемами, одна з них показана на рисунку 3.4.

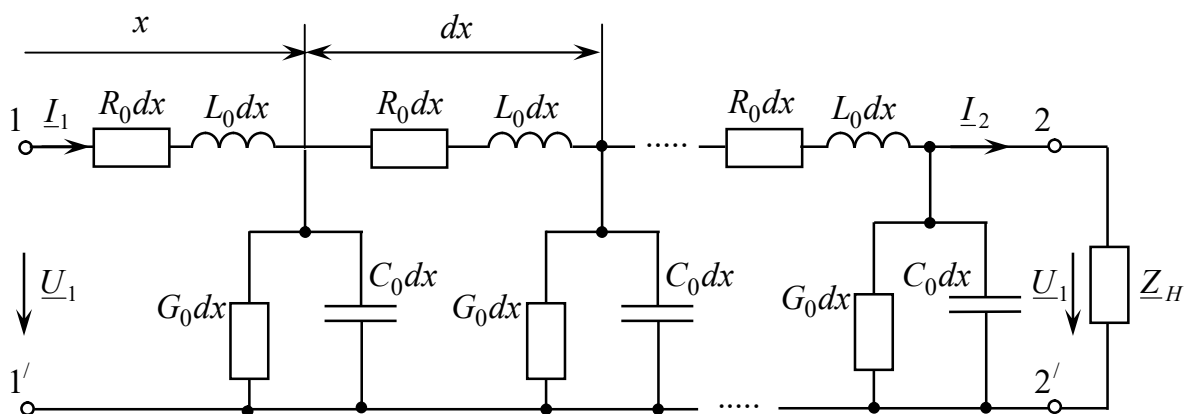


Рисунок 3.4 – Схема однорідної лінії з розподіленими параметрами

До вхідних затискачів лінії «1-1'» під'єднують джерело енергії, а до вихідних «2-2'» – навантаження. Джерелами енергії можуть бути генератори постійної або змінної синусоїдальної напруги. Характер навантаження може бути різним, від короткого замикання (к.з.) до холостого ходу (х.х.).

Дослідження однорідної лінії з розподіленими параметрами краще проводити на основі формальної аналогії між такою лінією та послідовним з'єднанням чотирьох полюсників.

Загальний стан лінії для будь-якого навантаження можна охарактеризувати рівняннями:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{x\delta} \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l \\ \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{x\delta}} \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \cdot \operatorname{ch} \underline{\gamma} l \end{cases}, \quad (3.9)$$

де $\underline{U}_1, \underline{I}_1, \underline{U}_2, \underline{I}_2$ – напруги та струми на вході та виході лінії;

$\operatorname{ch} \underline{\gamma} l, \operatorname{sh} \underline{\gamma} l$ – гіперболічні функції від добутку коефіцієнта розповсюдження $\underline{\gamma}$ та довжини лінії l ;

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} = \alpha + j \cdot \beta - \text{коефіцієнт розповсюдження}; \quad (3.10)$$

α – коефіцієнт загасання;

β – коефіцієнт фази;

$\underline{Z}_0 = R_0 + j \cdot \omega \cdot L_0$ – комплексний опір одиниці довжини лінії;

$\underline{Y}_0 = G_0 + j \cdot \omega \cdot C_0$ – комплексна провідність одиниці довжини лінії;

Формально схожі рівняння має пасивний симетричний чотириполіусник і якщо розглядати довгу лінію як чотириполіусник, то виходить:

$$A = \operatorname{ch} \underline{\gamma} l, \quad B = \underline{Z}_{x\delta} \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l; \quad C = \frac{\operatorname{sh} \underline{\gamma} l}{\underline{Z}_{x\delta}}, \quad D = \operatorname{ch} \underline{\gamma} l, \quad (3.11)$$

$$\operatorname{th} \underline{\gamma} l = \frac{\sqrt{B \cdot C}}{A}, \quad (3.12)$$

$$\underline{Z}_{x\delta} = \sqrt{B/C}. \quad (3.13)$$

3.5 Порядок виконання роботи

1. Визначення коефіцієнтів чотириполіусника.

Розрахувати за формулами (3.1) – (3.4) коефіцієнти A, B, C, D симетричного Т-подібного чотириполіусника, якщо частота напруги джерела $e(t) - f = 500$ Гц, а його параметри – $R_0 = 13$ Ом, $L_0 = 0,075$ Гн, $C_0 = 0,22$ мкФ (рис. 3.4), тобто

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = R + j \cdot \omega \cdot L, \quad \underline{Z}_3 = -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}.$$

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти симетричного Т-подібного чотириполіусника

<u>A</u>	<u>B</u> , Ом	<u>C</u> , См	<u>D</u>

Перевірити справедливість розрахунків коефіцієнтів за співвідношенням: $A \cdot D - B \cdot C = 1$ та занести результати до таблиці 3.1

2. Визначення опорів чотириполіусника в режимі холостого ходу та короткого замикання.

Знайти опори чотириполіусника в режимі холостого ходу та короткого замикання за формулами: $\underline{Z}_{\text{вх } xx} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}} = \frac{|\underline{U}_{1xx}|}{|\underline{I}_{1xx}|} \cdot e^{j\varphi_{1xx}}$, $\underline{Z}_{\text{вх } kz} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}} = \frac{|\underline{U}_{1kz}|}{|\underline{I}_{1kz}|} \cdot e^{j\varphi_{1kz}}$.

Для виконання експерименту необхідно зібрати електричну схему, що показана на рисунку 3.5. В якості джерела напруги використати блок змінної напруги стенду УИЛС-1.

Як навантаження $\underline{Z}_H$ взяти активний опір R_4 з блоку змінного опору стенду УИЛС-1. Встановити напругу $U_1 = 12$ В частотою 500 Гц. Перевести прилад Щ4300 (або Щ4313) в режим виміру змінного струму. Мультиметр ВЛ-11 перевести в режим виміру змінної напруги.

Встановити межі вимірювання приладів Щ4313 (Щ4300) – 200 мА, ВЛ11 – 200 В. Для вимірювання куту зсуву між напругою та струмом необхідно використати цифровий осцилограф SDS 1022 DL. Змінювати значення $\underline{Z}_H$ та вимірювати значення I_1 , I_2 , U_1 , φ . Результати вимірів занести до таблиці 3.2.

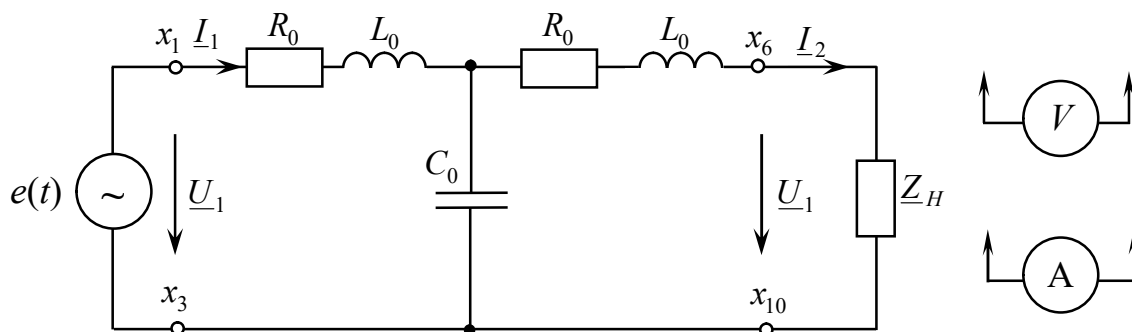


Рисунок 3.5 – Схема дослідження чотириполіусника

3. Дослідження лінії з розподіленими параметрами

За допомогою перемички поєднати затискачі 6 та 7, під'єднавши чотириполіусник до основної частини довгої лінії (рис. 3.6). До затискачів x_1, x_2 під'єднати джерело напруги 12 В частотою 500 Гц, а до затискачів x_9, x_{10} – навантаження (резистор R_4 з блоку змінних опорів). Амперметром та вольтметром вимірювати струм і напругу. Результати експерименту занести до таблиці 3.3.

Таблиця 3.2 – Результати вимірів, дослідження схеми на рисунку 3.5

$Z_H - R, \text{ Ом}$	$I_1, \text{ мА}$	$I_2, \text{ мА}$	$U_2, \text{ В}$	φ°
∞ , режим х.х.				
800				
600				
100				
0, режим к.з.				

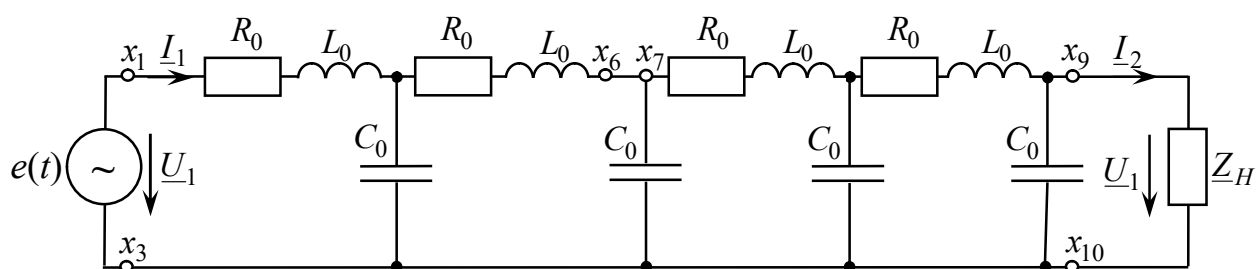


Рисунок 3.6 – Лінія з розподіленими параметрами

Таблиця 3.3 – Результати вимірів, дослідження схеми на рисунку 3.6

	$Z_H, \text{ Ом}$			
	∞	0	100	800
$U_{x1}, \text{ В}$				
$U_{x5}, \text{ В}$				
$U_{x6}, \text{ В}$				
$U_{x8}, \text{ В}$				
$U_{x9}, \text{ В}$				
$I_1, \text{ мА}$				
$I_2, \text{ мА}$				

3.6 Обробка експериментальних даних

1 Розрахувати хвильовий опір чотириполюсника за формулою

$$Z_{x6} = \sqrt{Z_{\text{вх хх}} \cdot Z_{\text{вх кз}}}.$$

2. За даними експерименту 2. побудувати графік залежності $I_2(R_H)$.

3. Розрахувати $th\gamma l$ для Т-образного елемента довгої лінії за формулою:

$$th\gamma l = \frac{\sqrt{B \cdot C}}{A} = \sqrt{\frac{Z_{\text{вх кз}}}{Z_{\text{вх нх}}}}. \quad (3.14)$$

За допомогою визначеного $th\gamma l$ розраховуємо α , β та γ наступним чином:

$$e^{2\gamma l} = \frac{1 + th\gamma l}{1 - th\gamma l} = K \cdot e^{j \cdot b}, \quad (3.15)$$

де $\ln K = e^a$;

$$a = 2 \cdot \alpha \cdot l;$$

$$b = 2 \cdot \beta \cdot l.$$

l – в нашому випадку дорівнює 1, тому $\beta = \frac{b}{2}$, $\alpha = \frac{a}{2}$;

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{\beta}{\alpha}}.$$

Результати розрахунків занести до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунків

$Z_{\text{вх}}$, Ом	γ , 1/км	α , 1/км	β , 1/км

4. За результатами проведеної лабораторної роботи зробити висновки про властивості лінії з розподіленими параметрами.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення електричного (магнітного) кола (лінії) з розподіленими параметрами та однорідної лінії з розподіленими параметрами.
2. Поясніть, що називають первинними та вторинними параметрами однорідної дводрової лінії.
3. Здійсніть вивід диференціальних рівнянь однорідної дводрової лінії.
4. Дайте визначення та охарактеризуйте характеристики усталеного режиму однорідної лінії.
5. Здійсніть вивід рівнянь в гіперболічній формі для визначення напруги та струму в будь-якій точці ліній при відомих напрузі та струмі на початку лінії.
6. Здійсніть вивід рівнянь в гіперболічній формі для визначення напруги та струму в будь-якій точці ліній при відомих напрузі та струмі на кінці лінії.
7. Дайте визначення фазової швидкості та довжини хвилі.
8. Дайте визначення вхідного опору лінії та коефіцієнта відбиття хвилі.
9. Дайте визначення та наведіть характеристики лінії без спотворень.
10. Дайте визначення лінії без втрат та вкажіть, яке її практичне застосування.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2002 – 640 с.
2. Основы теории цепей : учебник для вузов / [Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989– 528 с.
3. Теоретические основы электротехники. 4-е издание, дополненное для самостоятельного изучения курса / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб. : Питер, 2004 (т. 1 – 462 с., т. 2 – 575 с., т. 3 – 376 с.).
4. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – М. : Высшая школа, 1990 – 544 с.
5. М. П. Рибалко. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні електричні кола : підручник / М. П. Рибалко, В. О. Єсауленко, В. І. Костенко. – Донецьк : Новий світ, 2003 – 513 с.
6. Перхач В. С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола / В. С. Перхач. – Київ : Вища школа, 1992 – 439 с.

ДОДАТОК А

Порядкові номери і зразкові параметри елементів набірного поля

Таблиця А.1 – Перелік елементів набірного поля

Номер елемента	Вид елемента	Тип	R , Ом	L , мГн	C , мкФ	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, мА	$P_{ном}$, Вт
1	Резистор	МЛТ-2(1+1)	50	—	—			4
2	Резистор	МЛТ-2(1+1)	75	—	—			4
3	Резистор	МЛТ-2	100	—	—			2
4	Резистор	МЛТ-2	150					2
5	Резистор	МЛТ-2	200					2
6	Резистор	МЛТ-2	300					2
7	Резистор	МЛТ-2	510					2
8	Резистор	МЛТ-2	750					2
9	Резистор	МЛТ-2	820					2
10	Резистор	МЛТ-2	1000	—	—			2
11	Конденсатор	МБМ	—	—	0,1	160		
12	Конденсатор	МБМ	—	—	0,25	160		
13	Конденсатор	МБМ	—	—	0,5	160		
14	Конденсатор	МБМ	—	—	0,75	160		
15	Конденсатор	МБМ	—	—	1,0	160		
16	Конденсатор	МБМ	—	—	1,25	160		
17	Конденсатор	МБМ	—	—	1,5	160		
18	Конденсатор	МБМ	—	—	1,75	160		
19	Конденсатор	МБМ	—	—	2,0	160		
20	Індуктивність	—	—	2	—	—	225	
21	Індуктивність	—	—	3	—	—	190	
22	Індуктивність	—	—	5	—	—	150	
23	Індуктивність	—	—	7	—	—	125	
24	Індуктивність	—	—	10	—	—	100	
25	Індуктивність	—	—	15	—	—	85	
26	Індуктивність	—	—	20	—	—	75	
27	Індуктивність	—	—	30	—	—	60	
28	Індуктивність	—	—	50	—	—	50	
29	Індуктивність	—	—	70	—	—	40	

Додаток Б

Основні електричні величини і їх позначення

Таблиця Б. 1. – Позначення основних електричних величин і їхніх одиниць

Найменування фізичної величини	Позначення		Найменування фізичної величини	Позначення	
	вели- чина	оди- ниця		вели- ли- чина	оди- ниця
Ємність	C	Ф	Частота: • коливань; • кутова	f ω	Гц рад/с
Заряд	q	Кл	Струм	I, i	А
Індукція	B	Тл	Потенціал	V, φ	В
Індуктивність • власна; • взаємна	L M	Гн Гн	Потокозчеплення	ψ	Вб
Коефіцієнт потужності в синусоїдальному режимі	$\cos\varphi$	—	Проникливість (діелектрична) • вакууму • абсолютна • відносна	ε_o ε_a ε	Ф/м Ф/м —
Коефіцієнт трансформації	n	—	Проникливість (магнітна) • порожності; • абсолютна; • відносна	μ_o μ_a μ	Гн/м Гн/м —
Магнітний потік	Φ	Вб	Провідність: • повна; • активна; • реактивна	Y G X	См См См
Потужність: • повна • активна • реактивна	S P Q	ВА Вт ВАР	Сила електрорушійна	E, e	В
Напруга	u, U	В	Зсув фаз між напругою і струмом	φ	рад(°)
Напруженість поля: • електричного • магнітного	E H	В/м А/м	Опір • повний • активний • реактивний	Z R X	Ом Ом Ом
Початкова фаза	ψ	рад(°)	Число фаз багатофазної системи	m	—
Період	T	с	Число витків	n	—
Стала часу	τ	с	Енергія електромагнітна	W	Дж

ДОДАТОК В

Зразок оформлення титульного аркуша звітів з лабораторних робіт

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

КАФЕДРА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ
ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

ЗВІТИ ПРО ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ
З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»

Виконав:
студент гр. НВДЕ 2019-1

Поберій В.В.

Перевірила:

доц. Форкун Я.Б.

Харків – 2021

Виробничо-практичне видання

Методичні рекомендації

до виконання
лабораторних робіт
з навчальної дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ. ЧАСТИНА 3»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
усіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітні програми «Електротехнічні системи електроспоживання»,
«Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Укладачі : **ФОРКУН** Яна Борисівна,
ГЛІБОВА Марина Леонідівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *Я. Б. Форкун*

План 2022, поз. 220М

Підп. до друку 06.07.2022. Формат 60 × 84/16.
Електронне видання. Ум. друк. арк. 2,1.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.