

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

ЧАСТИНА 2

Київ 2011

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

ЧАСТИНА 2

для студентів напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи» спеціальностей «Електронні системи» та «Електронні прилади та пристрої» всіх форм навчання

Затверджено Вченою радою ФЕЛ НТУУ «КПІ»

Протокол № 12/11 від 26. 12. 2011 р.

Київ 2011

Теорія електричних кіл. Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи» спеціальностей «Електроніка» та «Електронні прилади та пристрої» всіх форм навчання. - К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 73 с.

Навчальне видання

Теорія електричних кіл. Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи» спеціальностей «Електронні системи» та «Електронні прилади та пристрої», всіх форм навчання

Укладачі:

Ромашко Володимир Якович, доц., д. т. н.
Морозов Віктор Григорович, ст. викл.
Батрак Лариса Миколаївна, ст. викл.

Відповідальний редактор:

Рогаль В. В. доц., к.т.н.

Рецензент:

Чайковський А.С. доц., к.т.н.

Київ - 2011

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА НА ФОРМУ СТРУМУ ПРИ ДІЇ ДЖЕРЕЛА НАПРУГИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФІЛЬТРІВ НА РЕАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ	17
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЛАНЦЮГІВ СТАЛОГО СТРУМУ	25
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЛАНЦЮГІВ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	35
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У RC – ЛАНЦЮГАХ.....	43
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У RL – ЛАНЦЮГАХ.....	56
ЛІТЕРАТУРА	69

ВСТУП

Методичні вказівки містять опис шести лабораторних робіт другої частини курсу, порядок їх виконання та оформлення.

Виконання лабораторних робіт складається з наступних етапів: теоретична підготовка до роботи, робота в лабораторії, оформлення звіту, аналіз одержаних результатів та захист лабораторної роботи. При підготовці до роботи студент повинен вивчити відповідний теоретичний матеріал, виконати попередні розрахунки параметрів елементів схем, підготувати необхідні графіки та заготовити таблиці для занесення результатів вимірювань.

На початку заняття викладач перевіряє готовність студентів до роботи і дає дозвіл на її виконання. Студенти, що не вивчили в достатньому обсязі теоретичний матеріал або не виконали попередні розрахунки, до виконання роботи не допускаються.

Після закінчення експериментів результати вимірювань необхідно показати викладачу, після чого вимкнути прилади, розібрати електричний ланцюг і навести порядок на робочому місці.

До наступного заняття студент повинен оформити звіт про виконану роботу і підготуватися до її захисту.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити: титульний аркуш, схеми вимірювань із зазначенням приладів, що використовуються, розрахункові формули, таблиці з результатами розрахунків і експериментальними даними вимірювань, графіки і осцилограми та висновки по роботі.

Під час захисту лабораторної роботи студент повинен пояснити та оцінити отримані в роботі результати, відповідати на контрольні запитання, а також вирішувати типові завдання за темою лабораторної роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРУ ЕЛЕМЕНТІВ
ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА НА ФОРМУ СТРУМУ ПРИ ДІЇ ДЖЕРЕЛА
НАПРУГИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ

МЕТА РОБОТИ: Дослідити вплив характеру елемента (резистора, котушки індуктивності, конденсатора) на форму струму в електричному колі при дії джерела напруги несинусоїдальної форми. Оцінити вплив зміни параметрів елементів на форму струму. Провести гармонічний аналіз напруги або струму графоаналітичним методом.

ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати електричне коло згідно рис. 1.1.

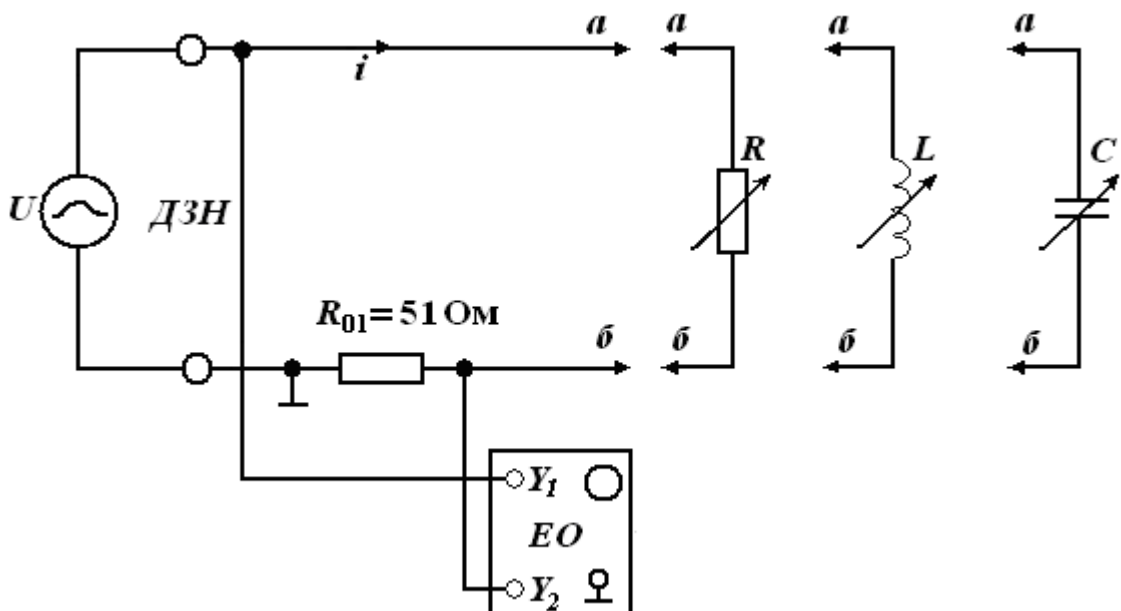


Рис. 1.1.

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

2. Підключити джерело змінної напруги (ДЗН). За допомогою електронного осцилографа (ЕО) встановити форму, частоту f та амплітуду вхідної напруги U_m згідно номеру варіанта (див. табл. 1.1.), де T - трикутна форма сигналу; Π - прямокутна (рис. 1.2.). Резистор $R_{01} = 51 \text{ Ом}$ використовують для спостереження форми струму в колі. Величина струму i пов'язана з напругою на резисторі $u_{R_{01}}$ законом Ома $i = \frac{u_{R_{01}}}{R_{01}}$.

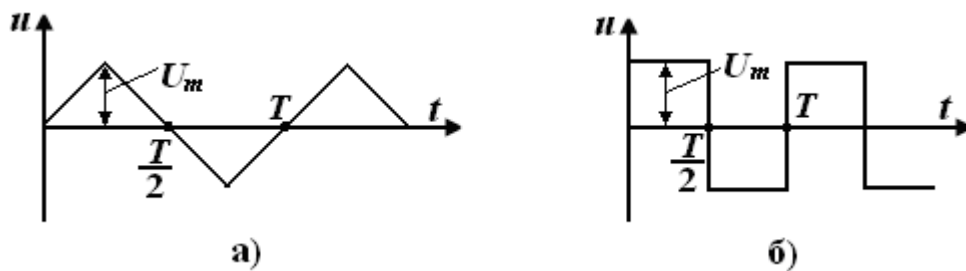


Рис. 1.2.

Таблиця 1.1

Варіант	Параметри сигналу			R , Ом	L , мГн	C , мкФ
	Форма сигналу	Частота, кГц	Амплітуда, В			
1	Т	1	10	100	30	0,5
2	П	2	12	50	20	3,0
3	Т	2	8	150	40	1,0
4	П	4	14	200	30	2,5
5	Т	2,5	12	120	20	0,8
6	П	2,5	10	130	25	2,0
7	Т	4	8	100	10	0,4
8	П	1	14	200	40	5,0
9	Т	2	12	150	30	1,2
10	П	1,2	10	250	25	4,0

Задані величини занести в табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

f , кГц	U_m , В	R , Ом	L , мГн	C , мкФ

3. Дослідити вплив опора резистора R на форму струму.

3.1. Підключити до точок a та b блок змінного опору і встановити опір R відповідно до варіанту завдання.

3.2. Використовуючи двопробеневий режим роботи осцилографа, замалювати у масштабі осцилограми вхідної напруги та струму у колі при активному навантаженні. Форма струму співпадає з формою напруги на резисторі R_{01} . Перед виконанням цього пункту треба відкалібрувати підсилювачі вертикального та горизонтального відхилення променя луча I-го та II – го каналів осцилографа.

3.3. Збільшуючи та зменшуючи величину опору R на 20 ... 30% відносно початкового значення, спостерігати його вплив на амплітуду та форму струму в електричному колі.

4. Дослідити вплив котушки індуктивності на форму струму.

4.1. Відключити резистор R . Підключати до точок a та b блок змінної індуктивності і встановити індуктивність L відповідно до варіанту завдання.

4.2. Замалювати осцилограми вхідної діючої напруги та струму при активно-індуктивному навантаженні.

4.3. Збільшуючи та зменшуючи величину індуктивності L на 20 ... 30% відносно початкового значення, спостерігати її вплив на амплітуду та форму струму в електричному колі. При цьому звернути увагу на те, як змінюється часовий зсув між напругою і струмом.

5. Дослідити вплив ємності конденсатора на форму струму.

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

5.1. Відключити котушку індуктивності L . Підключити до точок a та b блок змінної ємності і встановити ємність відповідно до варіанту завдання.

5.2. Замалювати осцилограми вхідної напруги та струму при активно-ємнісному навантаженні.

5.3. Збільшуючи та зменшуючи величину ємності C на 20 ... 30% відносно початкового значення, спостерігати її вплив на форму струму в електричному колі та часовий зсув між вхідною напругою та струмом.

6. Провести графоаналітичним методом гармонічний аналіз графіка однієї з величин: $i_R(t)$; $i_L(t)$; $i_C(t)$; $u(t)$, вказаної викладачем.

6.1. Накреслити у збільшеному масштабі графік функції, що досліджується з нанесеними точками відліку p .

6.2. Занести до табл. 1.3. значення функції у точках відліку. Кількість точок поділу $m = 18$, період $T = \dots$ мкс.

6.3. Результати розрахунків занести в табл. 1.4.

Таблиця 1.3.

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$f(p)$																		

Таблиця 1.4.

Номер гармоніки	$\kappa = 1$		$\kappa = 3$		$\kappa = 5$	
Розрахований параметр	$Am_{(1)}$	Ψ_1	$Am_{(3)}$	Ψ_3	$Am_{(5)}$	Ψ_5

6.4. Записати аналітичний вираз одержаного ряду Фур'є.

6.5. Побудувати та порівняти графіки вихідного сигналу та алгебраїчну суму розрахованих гармонік.

7. Зробити висновки по роботі.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Основні форми запису ряду Фур'є.
2. Які функції можна розкласти у тригонометричний ряд Фур'є?
3. Види симетрії періодичних функцій та їх вплив на форму запису ряду Фур'є.
4. Частотний спектр періодичного сигналу.
5. Визначення діючого значення несинусоїдальної напруги і струму через діючі значення її гармонічних складових.
6. Як виміряти діюче значення змінної складової несинусоїдальної напруги? Приладами якої системи вимірюють діючі значення змінного струму та напруги?
7. Як розрахувати значення повної, активної та реактивної потужностей у колі несинусоїдного струму?
8. Коефіцієнт спотворення струму.
9. Коефіцієнт гармонік несинусоїдального струму.
10. Чому при синусоїдальній діючій напрузі форма струму та напруги в реактивних елементах співпадають, а при несинусоїдальній діючій напрузі - не співпадають?
11. Залежність опору індуктивності для змінного струму від частоти.
12. Залежність опору ємності для змінного струму від частоти.
13. Як розрахувати струми та напруги в лінійному електричному колі при дії джерел напруги несинусоїдальної форми?
14. Пояснити осцилограми струму у колі при активному, активно-ємнісному та активно-індуктивному навантаженні.
15. Побудувати спектр вхідної напруги.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Періодичними несинусоїдальними струмами та напругами називають струми та напруги, які змінюються в часі за періодичним несинусоїдальним законом.

В лінійних колах несинусоїдальні струми виникають внаслідок дії джерел несинусоїдальних EPC та струму або під дією джерел синусоїдальних EPC та струму, якщо один або декілька елементів кола нелінійні. В електричних колах з джерелами постійної або синусоїдальної EPC несинусоїдальні струми, також, можуть виникати внаслідок періодичної зміни у часі параметрів елементів.

Це характерно для кіл електров'язку, електронних та напівпровідникових приладів, де це пов'язано з їхньою роботою.

Явища, що відбуваються в лінійних колах у випадку періодичних, але несинусоїдальних EPC , напругах та струмах найпростіше досліджувати, якщо періодичні функції струму, напругу, EPC , розкласти у тригонометричний (гармонійний) ряд Фур'є.

Як відомо з курсу математики, будь яку періодичну функцію часу $f(t)$, що задовольняє умовам Діріхле, можна розкласти в тригонометричний ряд

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \quad (1.1)$$

або у згорнутому вигляді

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(k\omega t + \psi_k), \quad (1.2)$$

де k – номер гармоніки;

ω – кутова частота функції $f(t)$ (частота першої гармоніки);

$k\omega$, ψ_k – кутова частота та початкова фаза k – і гармоніки;

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

$A_0 = \frac{a_0}{2}$ - постійна складова функції (амплітуда нульової гармоніки);

a_k, b_k – амплітуда косинусної та синусної складової k – і гармоніки.

Форми запису (1.1) та (1.2) взаємопов'язані.

Постійна складова A_0 дорівнює середньому значенню функції за період повторення T :

$$A_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt.$$

Коефіцієнти гармонійного ряду a_k, b_k визначаються за формулами

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt;$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt.$$

Знаючи коефіцієнти гармонійного ряду, легко перейти до визначення амплітуди та початкової фази k -ої гармоніки

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \operatorname{tg} \psi_k = \frac{a_k}{b_k}.$$

$$b_k = c_k \cos \psi_k; \quad a_k = c_k \sin \psi_k.$$

При визначенні кута ψ_k треба з урахуванням знаків коефіцієнтів a_k та b_k , встановити в якому квадранті розташований кут ψ_k .

В електричних колах функції $f(t)$ – це періодичні несинусоїдальні ЕРС, напруги або струми.

Формули для обчислення коефіцієнтів ряду Фур'є типових функцій наведено у довідниках.

Наприклад, для напруг, форма яких наведена на рис. 1.2, а, б, ряд Фур'є відповідно має вигляд:

$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right); \quad (1.3)$$

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

$$u(t) = \frac{8U_m}{\pi^2} \left(\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \frac{1}{49} \sin 7\omega t + \dots \right); \quad (1.4)$$

Для розрахунку лінійних електричних кіл з несинусоїдальними джерелами живлення застосовують метод накладення. Струми та напруги розраховують незалежно для постійної та кожної гармонічної складової. Миттєве значення струму в колі дорівнює сумі миттєвих значень складових струмів. Таким чином, розрахунок лінійного кола з несинусоїдальними ЕРС ведеться за правилами розрахунку кіл постійного струму для постійних складових (якщо вони є) та за правилами розрахунку кіл синусоїдного струму для гармонійних складових. При вирішенні цих задач потрібно враховувати, що індуктивний опір для k -ої гармоніки в k разів більше, а ємнісний, навпаки, в k разів менше, ніж для першої:

$$X_{Lk} = k\omega L = kX_{L1};$$
$$X_{Ck} = \frac{1}{k\omega C} = \frac{X_{C1}}{k},$$

де X_{L1} , X_{C1} - індуктивний та ємнісний опір для 1 – ї гармоніки.

Прилади магнітоелектричної системи, ввімкнуті у коло несинусоїдального струму, вимірюють постійну складову струму та напруги, а прилади електромагнітної, електродинамічної та теплової систем - діючі значення. Якщо вимірювана напруга має постійну та змінну складові, діюче значення змінної складової напруги можна виміряти за допомогою вольтметра електромагнітної системи, що з'єднаний послідовно з конденсатором. Оскільки постійний струм через конденсатор не проходить, то по вимірювальній обмотці вольтметра буде протікати тільки струм, зумовлений змінною складовою вимірюваної напруги. Тому вольтметр вимірюватиме тільки змінну складову. Ємність конденсатора необхідно вибирати таким чином, щоб похибка вимірювання не перевищувала 5%. Це можливо тоді, коли спад змінної напруги на конденсаторі не перевищує 5%

від змінної складової вимірюваної напруги. Ємність конденсатора визначається саме з цієї умови.

Якщо періодична функція $f(t)$ (напруга або струм) задана у вигляді графіка і не може бути описана простим аналітичним виразом, для її розкладання в тригонометричний ряд використовують графоаналітичний метод. При цьому період функції T розбивають на m рівних частин ($m = 18$). В точках розбиття (або в середині інтервалів розбиття) визначають числові значення функції $f(p)$, де p - номер інтервалу, причому $p = 1, 2, \dots, m$.

Коефіцієнти ряду Фур'є визначають з таких виразів

$$A_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m f(p);$$

$$a_k = \frac{2}{m} \sum_{p=1}^m f(p) \cos k \frac{2\pi}{m} p;$$

$$b_k = \frac{2}{m} \sum_{p=1}^m f(p) \sin k \frac{2\pi}{m} p.$$

У випадку, коли функція $f(t)$ є парною, тобто для неї виконується умова $f(t) = f(-t)$, у тригонометричному ряді (1.1) будуть відсутні синусні складові ($b_k = 0$).

Якщо функція $f(t)$ є непарною, тобто $f(t) = -f(-t)$, у тригонометричному ряді (1.1) будуть відсутні косинусні складові ($a_k = 0$).

Якщо функція $f(t)$ симетрична відносно осі часу t , тобто $f\left(t + \frac{T}{2}\right) = -f(t)$, у тригонометричному ряді (1.1) будуть відсутні усі парні гармоніки ($a_{2k} = b_{2k} = 0$), а також стала складова $\left(A_0 = \frac{a_0}{2} = 0\right)$.

Для наочного представлення гармонічного складу періодичного сигналу будують його частотний спектр амплітуд і фаз. По осі абсцис

відкладають номер k або частоту $k\omega$ гармонічних складових, а по осі ординат – значення амплітуд c_k або початкових фаз ψ_k (рис. 1.3). Постійна складова розглядається як гармоніка з нульовою частотою $\omega = 0$ ($k = 0$) і амплітудою A_0 .

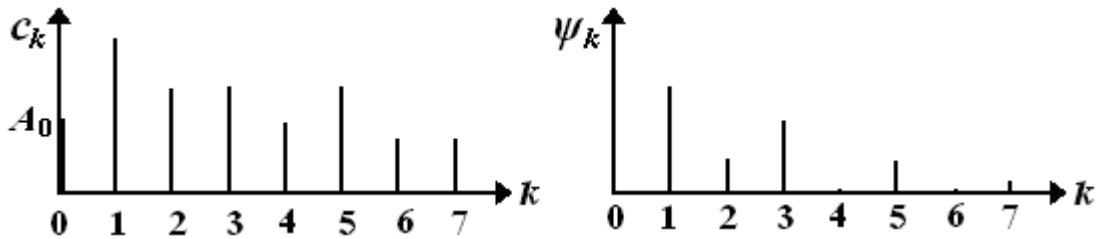


Рис. 1.3

Якщо в електричному колі діє несинусоїдальна напруга $u(t)$, опір реактивних елементів для k – х гармонік цієї напруги X_{Lk} та X_{Ck} буде мати різну величину. Тому частотні спектри напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ будуть мати різний вигляд, а форма струму та напруги не будуть співпадати. Якщо електричне коло складається тільки з резистивних елементів, опір яких не залежать від частоти, спектри струму та напруги будуть аналогічні, а форма струму буде співпадати з формою напруги.

Як приклад, для прямокутної напруги (рис. 1.2, а) ($A_0 = 0$; $a_k = 0$; $b_{2k} = 0$; $\psi_k = 0$; $c_k = b_k$) частотний спектр амплітуд має вигляд (рис. 1.4).

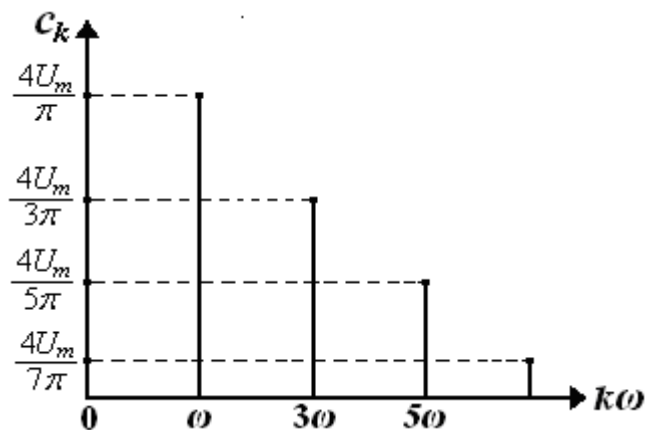


Рис. 1.4

Діюче значення несинусоїдальної напруги може бути визначено через діючі значення її гармонічних складових

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_{(1)}^2 + U_{(2)}^2 + \dots + U_{(k)}^2 + \dots},$$

де U_0 – постійна складова напруги; $U_k = \frac{U_{m(k)}}{\sqrt{2}}$ – діюче значення k -ї гармонічної складової напруги, $U_{m(k)} = c_k$ – амплітуда k -ї гармоніки.

Активна потужність періодичного струму визначається як середня потужність за період T :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt,$$

де u, i – миттєві значення напруги і струму.

Якщо миттєві значення напруги та струму розкласти у тригонометричні ряди та врахувати, що середнє за період значення добутку миттєвих значень синусоїд різної частоти дорівнює нулю, активна потужність у колі несинусоїдного струму

$$P = P_0 + \sum_{k=1}^{\infty} P_k = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k,$$

де $P_0 = U_0 I_0$ – активна потужність постійної складової; $\sum_{k=1}^{\infty} P_k$ – сума активних потужностей окремих гармонік; φ_k – зсув фази між k -ми гармоніками напруги і струму.

Реактивна потужність у колі несинусоїдного струму

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k,$$

де $\sum_{k=1}^{\infty} Q_k$ – сума реактивних потужностей окремих гармонік.

Повна потужність у колі несинусоїдного струму

$$S = UI,$$

де U , I - діючі значення несинусоїдних напруги та струму, які, також, можна визначити за відомими формулами:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}; \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

В колах несинусоїдального струму на відміну від кіл синусоїдального струму квадрат повної потужності звичайно перевершує суму квадратів активної та реактивної потужностей

$$S^2 \geq P^2 + Q^2,$$

що обумовлено відмінністю форм струму та напруги.

Величина

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

називається **потужністю спотворення**, тому, що як вона зумовлена несинусоїдальністю струмів та напруг.

Ступінь відмінності напруги або струму від синусоїдальної форми оцінюють за допомогою таких коефіцієнтів:

коефіцієнт гармонік

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{U^2 - U_{(1)}^2}{U_{(1)}^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} U_{(k)}^2}{U_{(1)}^2}},$$

де U - діюче значення несинусоїдної напруги; $U_{(1)} = \frac{U_{m(1)}}{\sqrt{2}}$ - діюче

значення 1-ї гармоніки; $\sum_{k=2}^{\infty} U_{(k)}^2$ - сума квадратів діючих значень вищих гармонік;

коефіцієнт спотворення

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

$$K_{СП} = \frac{U_{(1)}}{U} .$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФІЛЬТРІВ НА РЕАКТИВНИХ
ЕЛЕМЕНТАХ**

МЕТА РОБОТИ: Дослідити роботу T -та Π -подібних фільтрів на реактивних елементах. За експериментальними даними побудувати амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристику фільтра. Розрахувати та побудувати залежність коефіцієнта згасання фільтра від частоти. Дослідити проходження сигналу несинусоїдальної форми різних частот через фільтр.

ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Визначити схему фільтра (рис. 2.1) та значення параметра заданого елемента L або C , що буде використовуватися в фільтрі, у відповідності до варіанту завдання (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Варіант	Частота зрізу f_z , кГц	Тип фільтра	Схема фільтра	Значення параметра заданого елемента L або C	Напруга джерела змінної напруги U_1 , В
1	1,5	ФНЧ	T	60 мГн	12
2	1,0	ФВЧ	T	0,25 мкФ	14
3	1,8	ФНЧ	T	60 мГн	16
4	1,5	ФВЧ	T	0,125 мкФ	10
5	1,6	ФНЧ	T	60 мГн	12
6	1,5	ФНЧ	Π	0,20 мкФ	14
7	2,0	ФВЧ	Π	25 мГн	16
8	1,1	ФНЧ	Π	0,5 мкФ	10
9	1,5	ФВЧ	Π	30 мГн	12
10	2,3	ФНЧ	Π	0,1 мкФ	14

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

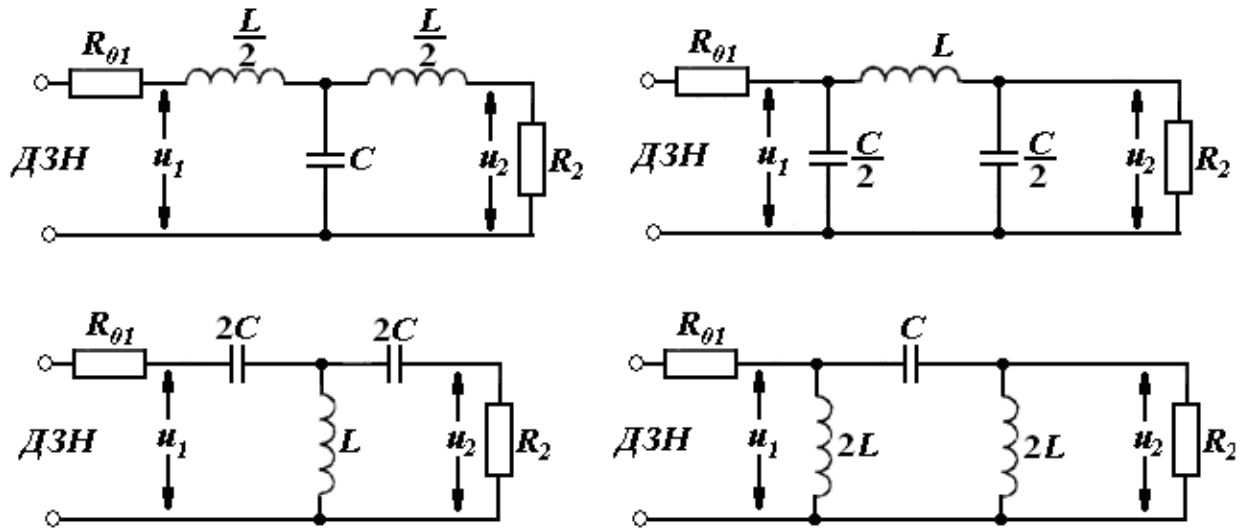


Рис. 2.1.

2. Розрахувати характеристичний опір ρ та параметр невідомого елемента фільтра (L або C), за заданою частотою зрізу f_3 та значенням параметра елемента, заданого в табл. 2.1:

для ФНЧ, ФВЧ:

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

для ФНЧ:

$$f_3 = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}},$$

для ФВЧ:

$$f_3 = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}},$$

де ρ , Ом, L , Гн, C , Ф, f_3 , Гц.

Параметри схеми, що досліджується занести в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Хвильовий опір ρ , Ом	Індуктивність L , Гн	Ємність C , мкФ	Частота зрізу f_3 , кГц	
			за завданням	експериментальне значення

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

3. Скласти схему фільтра відповідно до варіанту завдання з урахуванням проведених обчислень (рис. 2.1). Резистор $R_{01} = 51$ Ом. Як навантаження фільтра R_2 використовувати блок змінного опору, встановивши на ньому опір $R_2 = \rho$. Подати на вхід фільтра напругу U_1 синусоїдальної форми від джерела змінної напруги (ДЗН), параметри якої відповідають варіанту завдання.

4. Змінюючи частоту вхідної напруги U_1 спочатку дискретно, а потім плавно регулятором "Частота" експериментально визначити частоту зрізу фільтра f_3 по різкій зміні вихідної напруги U_2 та записати її в табл. 2.2. Якщо одержане значення f_3 сильно відрізняється від заданого в табл. 2.1. (більше ніж на 20%) з'ясувати причину і усунути її. Вимірювання частоти здійснювати за допомогою мультиметра або осцилографа.

5. Зняти амплітудно-частотну (АЧХ) та фазо-частотну (ФЧХ) характеристику фільтра:

$$K = F_1(f^*) \text{ (АЧХ);}$$

$$\varphi = F_2(f^*) \text{ (ФЧХ),}$$

де $K = U_2/U_1$ - коефіцієнт передавання; φ – кут зсуву фаз вихідної напруги U_2 відносно вхідної U_1 ; f – частота вхідної напруги; $f^* = f/f_3$ - відносна частота.

Змінюючи частоту f напруги U_1 на вході фільтра в діапазоні $(0,5 \dots 2,0)f_3$, вимірювати за допомогою двоканального осцилографа амплітуди напруг U_1 на вході та U_2 на виході фільтра, а також кут зсуву фаз φ між ними. Експериментальні дані занести до табл. 2.3.

6. Побудувати графіки амплітудно - частотної та фазо-частотної характеристик фільтра, а також графік залежності коефіцієнта загасання від частоти $\alpha = F_3(f^*)$. Використовуючи графіки АЧХ визначити експериментальне значення частоти зрізу f_3 .

Таблиця 2.3.

Відносна частота $f^* = f/f_3$	0,5																	2,0	
Напруга на вході, $U_1, \text{В}$																			
Напруга на виході, $U_2, \text{В}$																			
Кут зсуву фаз $\varphi, ^\circ$																			
Коефіцієнт передавання $K = U_2/U_1$																			
Коефіцієнт загасання $\alpha = \ln(1/K), \text{Нп}$																			
Коефіцієнт загасання $\alpha = 20 \lg(1/K), \text{дБ}$																			

7. Подаючи на вхід фільтра напругу прямокутної та трикутної форми з амплітудою, що відповідає варіанту завдання, дослідити залежність форми вихідної напруги від частоти. Замалювати за допомогою двоканального осцилографа для обох форм сигналів осцилограми вхідної та вихідної напруги для $f^* = 0,5; 1,0$ та $1,5$. Пояснити одержані результати.

8. Якісно оцінити вплив опору навантаження R_2 на величини k та φ (п.5).

9. Зробити висновки по роботі.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке електричні фільтри?
2. Чому до складу фільтра обов'язково повинні входити реактивні елементи електричного кола?
3. Чим відрізняються Т - подібні та П - подібні фільтри?

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

4. Які фільтри відносяться до фільтрів типу k ? До фільтрів типу m ?
5. Що таке амплітудно - частотна та фазо - частотна характеристика фільтра?
6. Залежність опору для змінного струму індуктивності та ємності від частоти.
7. Залежність опору для змінного струму послідовного та паралельного коливального контура від частоти.
8. Амплітудно - частотні та фазо - частотні характеристики фільтрів: нижніх частот, верхніх частот, полосових та загороджувальних.
9. Чому при проходженні через фільтр синусоїдального сигналу його форма не змінюється, а при проходженні сигналу прямокутної або трикутної форми, вихідний сигнал має форму, що відрізняється від форми сигналу на вході?
10. Як змінюється спектр несинусоїдального сигналу при його проходженні через фільтр?

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електричний фільтр - це чотиріполюсник, який підключається між джерелом вхідної напруги та навантаженням (споживачем), коефіцієнт передавання якого $K = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$ залежить від частоти. Графік залежності коефіцієнта K передавання від частоти $K = F_1(f)$ називається амплітудно - частотною характеристикою фільтра, а графік залежності зсуву фаз φ між вхідною та вихідною напругами від частоти $\varphi = F_2(f)$ - фазо-частотною характеристикою.

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

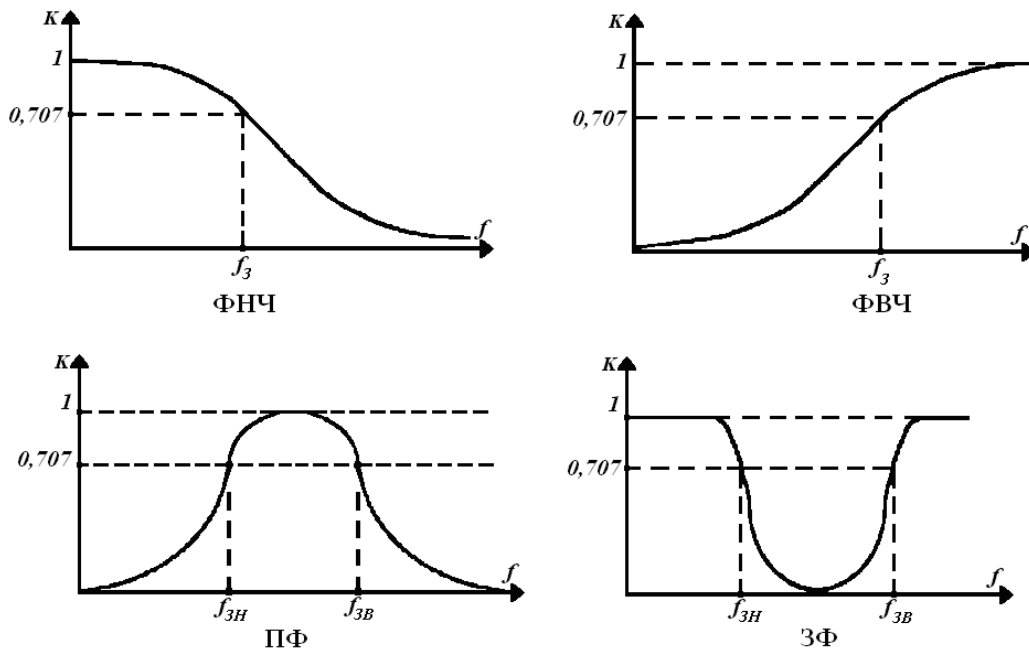
Величина, обернена до коефіцієнта передавання називається коефіцієнтом загасання α . Коефіцієнт загасання може вимірюється в неперах або в децибелах:

$$\alpha = \ln \frac{1}{K}, \text{ Нп}; \quad \alpha = 20 \lg \frac{1}{K}, \text{ дБ.}$$

Для того, щоб коефіцієнт передавання фільтра залежав від частоти, до його складу повинні входити реактивні елементи, опір яких залежить від частоти.

Фільтри застосовують для пропускання або затримки сигналів, що надходять від джерела живлення до споживача, у певній смузі частот. В залежності від того, сигнали яких частот пропускаються або затримуються, фільтри, поділяються на чотири типи: фільтри низьких частот ($\Phi НЧ$), фільтри високих частот ($\Phi ВЧ$), смугові фільтри ($С\Phi$) та загороджувальні фільтри ($З\Phi$).

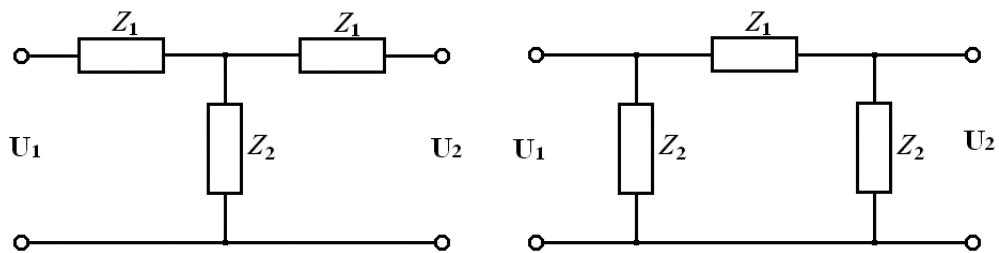
Амплітудно - частотні характеристики цих фільтрів мають такий вид:



У фільтрах на ідеальних елементах втрати потужності відсутні і максимальний коефіцієнт передавання $K = 1$. В реальних фільтрах із-за наявності втрат потужності максимальний коефіцієнт передавання $K < 1$.

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

Діапазон частот, у якому загасання сигналу мале (коефіцієнт передавання фільтра $K > 0,707$) називають смугою пропускання, або смугою прозорості фільтра. Діапазон частот, у якому загасання сигналу велике (коефіцієнт передавання фільтра $K < 0,707$) називають смугою затримки фільтра. Граничну частоту між смугою пропускання та смугою затримки називають частотою зрізу f_3 . Смуга пропускання фільтра нижніх частот лежить у діапазоні $(0 \dots f_3)$, фільтра високих частот - $(f_3 \dots \infty)$, а смугового фільтра - $(f_{3Н} - f_{3В})$. Загороджувальний фільтр має дві смуги пропускання $(0 \dots f_{3Н})$ та $(f_{3В} \dots \infty)$. Діапазон частот $(f_{3Н} - f_{3В})$ є смугою затримки цього фільтра. Найбільше застосування мають T - подібні та Π - подібні фільтри:



Якщо добуток опору послідовного елемента фільтра Z_1 на опір паралельного елемента Z_2 не залежить від частоти і є сталою величиною, то такий фільтр називають фільтром типу k , а якщо залежить від частоти – фільтром типу m . В k фільтрах опір навантаження, що під'єднується до виходу фільтра, повинен дорівнювати характеристичному опору ρ (узгоджене навантаження). В m - фільтрах навантаження може бути неузгодженим, так як в них характеристичний опір менш залежить від частоти, ніж у k - фільтрах.

Найпростіші T - подібні та Π – подібні симетричні фільтри одержують у тому випадку, коли елементи Z_1 та Z_2 , являють собою реактивні двополюсники протилежного характеру (ємність та індуктивність). У цьому випадку отримують фільтр низьких або високих частот. Якщо в якості елементів Z_1 та Z_2 використовуються паралельне та послідовне з'єднання

елементів L та C (паралельний або послідовний коливальний контур), одержимо смуговий або загороджувальний фільтр.

Якщо на вхід фільтра подати сигнал несинусоїдальної форми, то коефіцієнт передавання різних гармонік спектра цього сигналу буде різним. Тому спектр амплітуд вихідного сигналу буде відрізнятися від спектра сигналу на вході. Приклад наведений на рис. 2.2, де U_{mBX_k} - амплітуда k -ї гармоніки вхідної напруги; U_{mVIX_k} - амплітуда k -ї гармоніки вихідної напруги; k - номер гармоніки. Внаслідок цього і форма вихідного сигналу не буде співпадати з формою вхідного.

При проходженні несинусоїдального сигналу через фільтр змінюються не тільки амплітуди різних гармонік, а також і зсув фаз між k -ми гармоніками вхідного та вихідного сигналів, який можна визначити за фазо-частотною характеристикою фільтра. Це є ще однією причиною, внаслідок якої форма вихідної напруги фільтра відрізняється від форми вхідної.

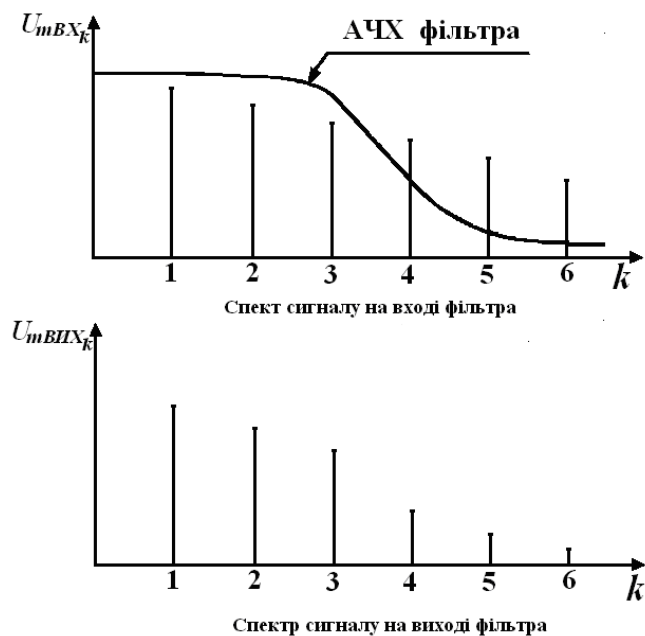


Рис. 2.2

Електричні фільтри часто застосовують для виділення певних гармонік із спектру вхідного сигналу.

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЛАНЦЮГІВ СТАЛОГО СТРУМУ

МЕТА РОБОТИ: Дослідити роботу нелінійного елемента (стабілітрона) в електричних ланцюгах сталого струму. Експериментально зняти та побудувати вольт - амперну характеристику нелінійного елемента. Визначити його основні параметри. Провести графо - аналітичний розрахунок ланцюга. Одержані результати порівняти з експериментальними. Ознайомитись з особливостями роботи стабілітрона у схемі параметричного стабілізатора напруги.

ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Скласти електричне коло, відповідно до рис. 3.1. В якості нелінійного елемента використовувати стабілітрон VD типу D815. Як лінійний елемент використовувати резистор $R = 100$ Ом з блоку змінного опору.

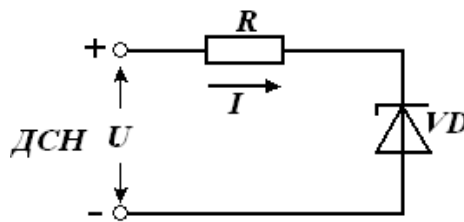


Рис. 3.1.

2. Подати на вхід електричного кола напругу U від джерела сталої напруги (ДСН). Змінюючи напругу в діапазоні від 0 до 20 В зняти вольт-амперну характеристику (ВАХ) нелінійного кола $I = f(U)$. Вимірювання струму здійснювати за допомогою цифрового вольтметра, підключеного

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

паралельно резистору R . Величина струму в колі обчислюється за законом Ома:

$$I = \frac{U_R}{R},$$

де U_R – напруга на резисторі R .

Вимірювання напруги U_R проводити з точністю не менше двох знаків після коми.

3. Результати вимірювань та розраховані значення напруги на стабілітроні ($U_{VD} = U - U_R$) занести до табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Напруга на вході U, В	0																20	
Напруга на опорі U_R, В																		
Струм у колі I, мА																		
Напруга на стабілітроні U_{VD}, В																		

4. За експериментальними результатами побудувати $ВАХ$ електричного кола.

5. На графіку $ВАХ$ електричного кола у відповідному масштабі побудувати $ВАХ$ лінійного резистора R . $ВАХ$ нелінійного елемента (стабілітрона) $I_{VD} = f(U_{VD})$ побудувати графічно, враховуючи, що через послідовно з'єднані елементи електричного кола R , VD протікає однаковий струм I .

6. За побудованою $ВАХ$ стабілітрона або за даними табл. 3.1 визначити напругу стабілізації U_{cm} , статичний r_{cm} , диференційний $r_{диф}$

та відносний $r_{диф}^* = \frac{r_{диф}}{r_{см}}$ опори стабілітрона для робочої точки, вказаної

викладачем. Отримані значення занести в табл. 3.2.

Струм у робочій точці $I =$ мА.

Таблиця 3.2.

$U_{см}, В$	$r_{см}, Ом$	$r_{диф}, Ом$	$r_{диф}^*, Ом$

7.Скласти електричний ланцюг відповідно до рис. 3.2. В якості резистора R_1 використовувати блок змінного опору, встановивши на ньому опір $R_1 = 100 Ом$. Як резистор R_2 використовувати резистор з елементів набірного поля з опором $R_2 = 300 \dots 600 Ом$.

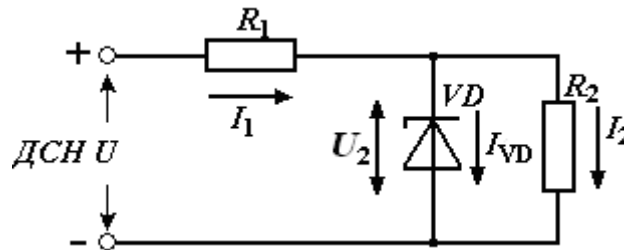


Рис. 3.2.

8. Подати на вхід ланцюга напругу $U = 20 В$ від джерела сталої напруги (ДСН). Виміряти за допомогою вольтметра напругу на резисторах U_1 та U_2 і розрахувати силу струму через резистори I_1 та I_2 . Використовуючи 1-й закон Кірхгофа, визначити струм через стабілітрон I_{VD} . Результати занести до табл. 3.3.

9. Використовуючи одержану в п. 5 ВАХ стабілітрона та вимірявши за допомогою мультиметра величину опору резистора R_2 , графічно побудувати ВАХ нелінійного двополюсника, що складається з паралельно з'єднаних резистора R_2 та стабілітрона VD : $U_2 = f(I_1)$.

Таблиця 3.3

Спосіб визначення	Параметр				
	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_{VD}, \text{мА}$
Експеримент, X_1					
Результат розрахунку методом пересікання, X_2					
Абсолютна похибка, $\Delta = X_2 - X_1$					
Відносна похибка $\delta = \frac{X_2 - X_1}{X_1} \cdot 100\%$					

10. Використовуючи одержану BAX нелінійного двополюсника, методом пересікання визначити напругу та струм в елементах електричного ланцюга $U_1, U_2, I_1, I_2, I_{VD}$ при напрузі на вході $U = 20 \text{ В}$. Одержані результати занести до табл. 3.3 і порівняти з експериментальними результатами. Розрахувати абсолютну та відносну похибки.

11. Ознайомитись з роботою стабілітрона VD в схемі параметричного стабілізатора напруги (рис. 3.2).

Змінюючи напругу U на вході стабілізатора в діапазоні від 0 до 20 В зняти залежність вихідної напруги стабілізатора U_2 від вхідної

$$U_2 = f(U).$$

Напругу U_2 вимірювати з точністю не менше двох знаків після коми. Результати вимірювань занести до табл. 3.4.

12. За даними табл. 3.4. побудувати графік передавальної характеристики $U_2 = f(U)$.

Таблиця 3.4.

Напруга на вході $U, \text{В}$	0														20
Напруга на виході $U_2, \text{В}$															

13. Показати на передавальній характеристиці робочу ділянку, яка відповідає режиму стабілізації вихідної напруги. Вибрати робочу точку посередині ділянки стабілізації та розрахувати коефіцієнт стабілізації стабілізатора за вхідною напругою $K_{ст}$ двома способами:

- а) використовуючи передавальну характеристику та дані табл. 3.4;
- б) розрахунковим шляхом через параметри елементів схеми стабілізатора. Порівняти одержані результати.

14. Зробити висновки по роботі, звернувши увагу на особливості роботи стабілітрона в колах постійного струму. Порівняти експериментальні та розрахункові параметри та характеристики. Вказати можливі причини розходження.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Лінійні, нелінійні та параметричні електричні ланцюги та їх особливості.
2. Вентильні елементи електричного кола та їх вольт-амперні характеристики. Вольт - амперна характеристика ідеального вентиля.
3. Вольт - амперні характеристики нелінійних елементів з немонотонною характеристикою, керованою напругою та керованою струмом.
4. Керовані елементи електричного кола та особливості їх вольт - амперних характеристик.

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

5. Особливості методу додавання вольт - амперних характеристик при послідовному, паралельному та змішаному з'єднанні елементів.
6. Розрахунок нелінійних ланцюгів методом пересікання. Визначення робочої точки нелінійного елемента.
7. Статичний, диференційний та відносний диференційний опір нелінійного елемента.
8. Побудова вольт - амперної характеристики ділянки електричного кола, що містить джерело напруги або струму.
9. Стабілітрон. Вольт - амперна характеристика стабілітрона при прямому та зворотньому включенні. Основні параметри стабілітрона.
10. Робота стабілітрона у схемі параметричного стабілізатора напруги. Робоча ділянка вольт - амперної характеристики стабілітрона.
11. Пояснити роботу параметричного стабілізатора напруги.
12. Як зміняться величини струмів і напруг на елементах стабілізатора при зміні вхідної напруги в сторону збільшення? В сторону зменшення?
13. Як зміняться величини струмів і напруг на елементах стабілізатора при зміні опору навантаження R_2 і постійній вхідній напрузі?
14. Коефіцієнт стабілізації стабілізатора та способи його розрахунку.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Елемент електричного кола, опір якого не залежить від часу, а також протікаючого через нього струму, або прикладеної до нього напруги називають лінійним елементом електричного кола. Якщо опір елемента залежить від часу, або якогось зовнішнього фактора, що змінюється у часі (наприклад, температури), то такий елемент називають параметричним елементом електричного кола. Якщо опір елемента залежить від протікаючого через нього струму, або

прикладеної напруги, то такий елемент є нелінійним елементом електричного кола.

Якщо до складу електричного ланцюга входить хоча б один нелінійний елемент, то такий ланцюг є нелінійним. Для нелінійних кіл не виконується принцип суперпозиції, тому при їх розрахунках не можна застосовувати метод накладання та інші методи, що базуються на принципі суперпозиції. Як наслідок, більшість методів, що застосовуються для розрахунку лінійних ланцюгів, для нелінійних ланцюгів не придатні.

Процеси в нелінійних колах описуються нелінійними алгебраїчними або диференційними рівняннями. Оскільки не існує єдиного метода розв'язання таких рівнянь, при розрахунку нелінійних кіл застосовують різні підходи, які враховують особливості нелінійних елементів, з яких складається коло.

На відміну від лінійного елемента, властивості нелінійного елемента не можна описати якимось одним параметром (наприклад його опором). Для повного описання властивостей резистивного нелінійного елемента треба знати залежність струму через елемент від прикладеної напруги $I = f(U)$, яка називається вольт - амперною характеристикою елемента. Для кожної робочої точки A цієї характеристики можна

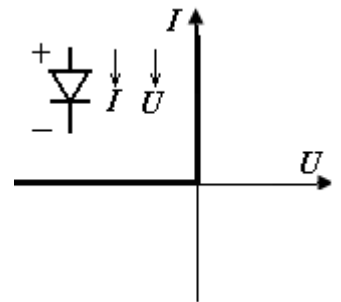
визначити статичний опір $r_{cm} = \frac{U_A}{I_A}$ та диференційний опір

$r_{\text{диф}} = \frac{du_A}{di_A} = \lim_{\Delta i_A \rightarrow 0} \frac{\Delta u_A}{\Delta i_A}$. Відношення диференційного опору до статичного

називають відносним диференційним опором $r_{\text{диф}}^* = \frac{r_{\text{диф}}}{r_{cm}}$. При

переміщенні робочої точки по вольт - амперній характеристиці, статичний та диференційний опір нелінійного елемента змінюються.

ВАХ лінійного елемента являє собою пряму лінію, що проходить через початок системи координат. Кут нахилу прямої до осі абсцис залежить від величини опору R лінійного елемента. ВАХ нелінійного елемента не є прямою лінією. У залежності від її виду та способу розташування на площині системи координат нелінійні елементи поділяються на ряд типів: активні та пасивні; з монотонною та немонотонною характеристикою; з симетричною та несиметричною характеристикою. Якщо опір нелінійного елемента суттєво залежить від величини або полярності прикладеної напруги, такий нелінійний елемент називають електричним вентилем.



В теорії електричних кіл вводять поняття ідеальний вентиль, який має такі властивості: $r = 0$ при $U \geq 0$; $r = \infty$, при $U < 0$. ВАХ ідеального вентиля та його умовне позначення наведені на рисунку.

Напрями струму I та напруги U , вказані на рисунку, в подальшому будемо вважати позитивними.

Особливістю параметричних елементів є те, що струм через них залежить не тільки від прикладеної напруги, але й від зовнішнього фактора, тобто є функцією двох змінних. Тому властивості такого елемента не можна описати однією ВАХ. Для їх описання використовують сімейства вольт-амперних характеристик, які знімають при різних фіксованих значеннях параметра.

ВАХ реальних нелінійних елементів найчастіше задають у вигляді графіків. Тому при розрахунках нелінійних кіл широко застосовуються графічні методи.

При розрахунку методом додавання характеристик будують сумарну ВАХ ділянки кола, або усього електричного ланцюга. В залежності від

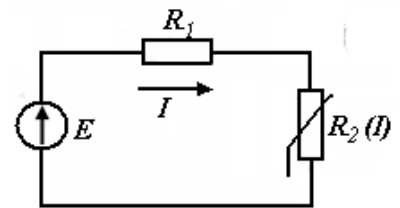
способу з'єднання елементів характеристики складають або при фіксованих значеннях струму, додаючи значення напруг на елементах (послідовне з'єднання елементів), або при фіксованих значеннях напруги, додаючи значення струмів через елементи (паралельне з'єднання елементів).

Якщо ділянка електричного кола містить джерело струму або напруги, її сумарна вольт-амперна характеристика будується за тими ж правилами з урахуванням вольт-амперної характеристики джерела напруги або струму. У будь-якому випадку для побудови сумарної ВАХ спочатку доцільно, з урахуванням заданих напрямків струмів та напруг в елементах кола, записати рівняння за законами Кірхгофа. Треба пам'ятати, що будь-який графічний метод розрахунку являє собою графічне відображення законів Кірхгофа.

Крім метода додавання характеристик широко застосовують графічний метод, який називається методом пересікання.

Наприклад, для наведеної схеми за 2 - м законом Кірхгофа

$$E = IR_1 + U_{R_2}(I).$$



Записавши це рівняння у вигляді

$$U_{R_2}(I) = E - IR_1$$

і побудувавши на графіку ВАХ нелінійного елемента графік залежності

$$u(I) = E - IR_1,$$

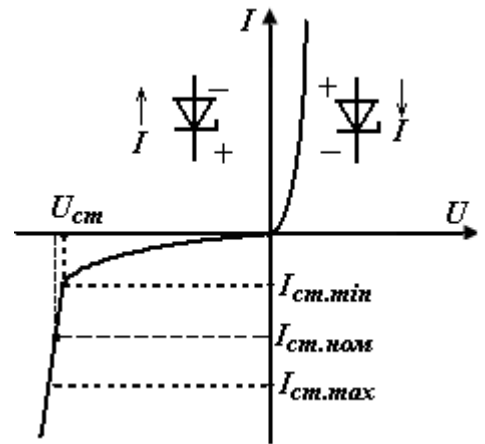
у точці перетину цих графіків визначимо режим роботи нелінійного елемента електричного кола.

Прикладом нелінійного елемента електричного кола є кремнієвий стабілітрон. На зворотній гілці його ВАХ існує ділянка електричного (лавинного або тунельного) пробою. При зміні зворотнього струму через стабілітрон від $I_{ст.мін}$ до $I_{ст.мак}$ напруга на стабілітроні $U_{ст}$ майже не

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

змінюється. Ця властивість стабілітрона застосовується у схемі параметричного стабілізатора напруги (рис. 3.2).

При зміні напруги на вході $U_{вх}$ вихідна напруга $U_{вих}$ спочатку також зростає, а потім майже не змінюється. Ділянка передавальної характеристики $U_{вих} = f(U_{вх})$, в межах якої напруга $U_{вих}$ майже не змінюється, є робочою ділянкою характеристики.

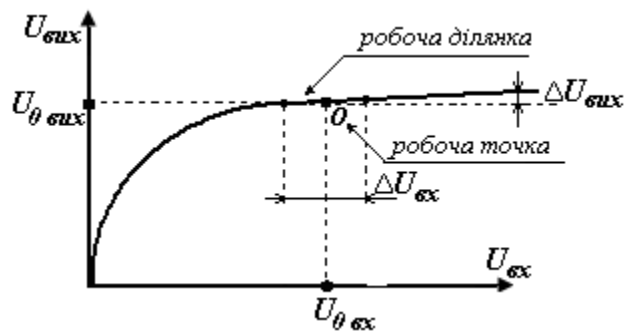


Якість стабілізатора характеризує його коефіцієнт стабілізації

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{0вх}} \bigg/ \frac{\Delta U_{вих}}{U_{0вих}},$$

де $U_{0вх}$, $U_{0вих}$ - вхідна та вихідна напруга стабілізатора в робочій точці O;

$\Delta U_{вх}$, $\Delta U_{вих}$ - прирощення напруги на вході та на виході стабілізатора, які обчислюються поблизу робочої точки.



Коефіцієнт стабілізації можна визначити з експериментально знятої передавальної характеристики, або розрахувати аналітично через відомі параметри елементів схеми за формулою

$$K_{cm} = \frac{U_{cm}}{U_{0вх}} \cdot \frac{R_1}{r_{диф}},$$

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

де $U_{ст} = U_{0вих}$ - напруга стабілізації стабілітрона в робочій точці; $r_{диф}$ - диференційний опір стабілітрона в робочій точці, який визначається за ВАХ стабілітрона або з табл 3.1.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЛАНЦЮГІВ ЗМІННОГО
СТРУМУ

МЕТА РОБОТИ: Дослідити роботу нелінійних елементів (стабілітрона та діода) у ланцюгах змінного струму. Експериментально зняти та графічно побудувати форму струмів та напруг в елементах досліджуваного кола при заданій формі напруги. Ознайомитись з роботою нелінійних елементів у схемах обмежувача напруги та випрямляча.

ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Скласти схему відповідно до рис. 4.1, де $R = (400 \dots 600)$ Ом і занести до табл. 4.1 параметри схеми.

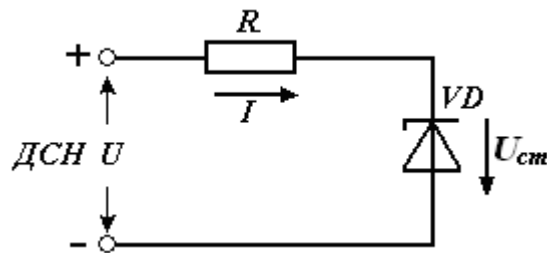


Рис. 4.1.

Таблиця 4.1.

$R, \text{ Ом}$	$U, \text{ В}$	$U_{см}, \text{ В}$

2. Подати на вхід від джерела сталої напруги (ДСН) напругу $U = 20 \text{ В}$ і виміряти напругу стабілізації стабілітрона $U_{см}$.

3. Скласти схему відповідно до рис. 4. 2. В якості нелінійного елемента використовувати стабілітрон, що досліджувався у п. 1, вважаючи його ВАХ ідеалізованою (рис. 4. 3). Порогова напруга $U_{пор} = 1$ В.

В якості резисторів R_1 та R_2 використовувати елементи набірного поля відповідно № 09 та № 10. Резистор $R \approx 100$ Ом з блоку змінних опорів ставити при необхідності, якщо при підключенні досліджуваної схеми у вхідній напрузі з'являється помітна стала складова. За допомогою мультметра виміряти опори резисторів. Параметри елементів схеми занести в табл. 4. 2.

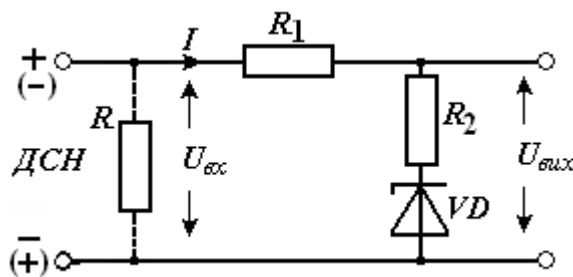


Рис. 4. 2

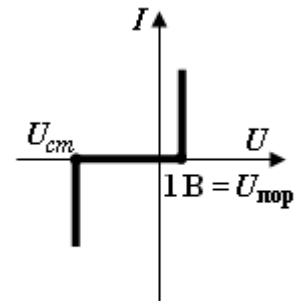


Рис. 4.3

Таблиця 4.2.

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	тип VD	$U_{см}, \text{ В}$

4. Подати на вхід схеми від джерела змінної напруги ДЗН змінну напругу трикутної форми. Встановити частоту цієї напруги $f = (1 \dots 2)$ кГц, а амплітуду $U_m = (1,5 \dots 2)U_{см}$, де $U_{см}$ – напруга стабілізації стабілітрона VD , визначена в п. 1. Зняти у відповідному масштабі осцилограми напруг на вході $U_{вх}$, виході $U_{вих}$ та на елементах схеми U_{R1} , U_{R2} , U_{VD} .

5. Подати на вхід змінну напругу синусоїдальної форми з тією ж амплітудою і частотою, що і у п. 4. Зняти осцилограми напруг на елементах схеми при дії на вході напруги синусоїдальної форми.

6. Подати на вхід змінну напругу прямокутної форми з тією ж амплітудою і частотою, що і у п. 4. Зняти осцилограми напруг на елементах

схеми при дії на вході напруги прямокутної форми.

7. Побудувати сумарну ВАХ електричного кола $U_{\text{вх}}(I)$ (рис. 4. 2), використовуючи ідеалізовану ВАХ стабілітрона (рис. 4. 3).

8. Використовуючи сумарну ВАХ, побудувати передавальну характеристику кола $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$.

9. За передавальною характеристикою, методом проєкцій побудувати форму вихідної напруги при дії на вході напруги синусоїдальної, прямокутної або трикутної форми (вказаної викладачем). Параметри напруги наведені у п. 4. Порівняти результати графічної побудови з результатами експерименту.

10. Скласти схему обмежувача напруги (рис. 4.4). Як резистор R_1 використовувати резистор № 10 з елементів набірного поля, VD – досліджуваний стабілітрон, резистор $R = 100$ Ом вмикається при необхідності.

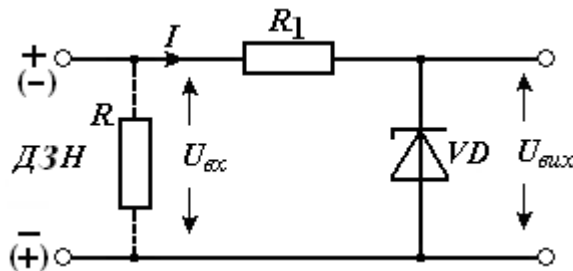


Рис. 4.4

Подати на вхід від джерела змінної напруги $ДЗН$ напругу синусоїдальної форми з частотою $f = (1 \dots 2)$ кГц та амплітудною $U_m = (2 \dots 3)U_{cm}$, де U_{cm} – напруга стабілізації стабілітрона. Зняти та замалювати у відповідному масштабі осцилограму вхідної та вихідної напруги. Визначити верхній та нижній пороги обмеження і занести їх до табл. 4.3.

11. Скласти схему найпростішого випрямляча змінної напруги (рис. 4.5)

В якості резистора R_1 використовувати резистор № 10 з елементів набірного поля, VD – напівпровідниковий діод, $R \approx 100$ Ом (вмикається при

необхідності).

Таблиця 4.3

f , кГц	U_m , В	R_1 , Ом	Верхній поріг обмеження, В	Нижній поріг обмеження, В

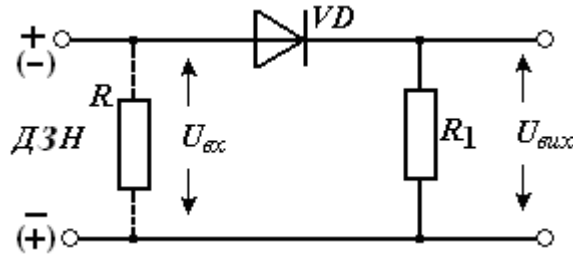


Рис. 4.5

Подати на вхід від джерела змінної напруги *ДЗН* напругу синусоїдальної форми частотою $f = (500 \dots 1000)$ Гц з амплітудою $U_m = 10 \dots 15$ В. Зняти та замалювати у відповідному масштабі осцилограму вхідної та вихідної напруги. Звернути увагу на те, що завдяки діоду у вихідній напрузі з'являється постійна складова.

12. Виміряти за допомогою вольтметра середнє значення вихідної напруги U_d . Розрахувати середнє значення вихідної напруги (постійну складову) за формулою

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt ,$$

де $u(t)$ – миттєве значення вихідної напруги.

13. Порівняти результати розрахунків та експерименту

14. Зробити висновки по роботі, звернувши увагу на те, що при наявності у колі нелінійних елементів, навіть при синусоїдальній напрузі джерела живлення, напруги і струми на елементах кола несинусоїдальні. Тобто нелінійні елементи змінюють спектр сигналу.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Статичні та динамічні вольт-амперні характеристики нелінійних елементів.
2. Статичний, диференційний, динамічний та еквівалентний опір нелінійного елемента .
3. Розрахунок нелінійних кіл змінного струму методом проєкцій.
4. Особливості метода проєкцій при немонотонній характеристиці нелінійного елемента.
5. Передавальна характеристика ланцюга та способи її побудови.
6. Визначення передавальної характеристики за відомою формою вхідного та вихідного сигналу.
7. Застосування законів Кірхгофа в ланцюгах змінного струму для побудови форми напруг та струмів в елементах.
8. Перетворення спектру сигналу електричними ланцюгами.
9. Основні галузі застосування нелінійних ланцюгів сталого струму.
10. Перетворення електричних сигналів за допомогою нелінійних ланцюгів.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Процеси, що протікають у нелінійних електричних ланцюгах змінного струму є значно складнішими, ніж у ланцюгах сталого струму. Це пов'язано з тим, що при дії змінного сигналу на нелінійний елемент, робоча точка зміщується по вольт-амперній характеристиці. При цьому змінюється статичний та диференційний опори нелінійного елемента. Крім того, у ланцюгах змінного струму суттєвий вплив на процеси мають реактивні елементи, зокрема нелінійні ємності та індуктивності.

Якщо процеси в нелінійному елементі електричного кола мають інерційний характер, вид його вольт-амперної характеристики буде залежати від швидкості зміни прикладеної напруги, або протікаючого струму. Тому для таких елементів слід розглядати статичну характеристику, яку знімають при сталих струмах та напругах, а також динамічну характеристику, яка знімається при змінному струмі. Статична та динамічна характеристики того ж самого елемента можуть суттєво відрізнятись. По динамічній вольт-амперній характеристиці визначають динамічний опір нелінійного елемента

$r_{дин} = \frac{du}{di}$. При зменшенні частоти струму форма динамічної характеристики поступово змінюється і динамічна характеристика поступово переходить у статичну. При цьому динамічний опір буде дорівнювати у диференційному.

При розрахунку ланцюгів змінного струму вводять параметр «еквівалентний опір», який дорівнює відношенню діючих значень напруги та струму на нелінійному елементі $r_e = U_{\partial} / I_{\partial}$. Головною особливістю нелінійних ланцюгів є те, що вони змінюють форму сигналу, поданого на вхід.

Дуже часто, метою аналізу нелінійних ланцюгів змінного струму є саме визначення форми вихідного сигналу за відомою формою сигналу на вході. Для цього широке застосування знаходить графічний метод розрахунку, який називається методом проєкцій. Для розрахунку методом проєкцій треба мати передавальну характеристику ланцюга – залежність вихідної величини від вхідної. Передавальну характеристику можна розрахувати аналітично, побудувати графічно, або зняти експериментально. Якщо нелінійний ланцюг містить елемент з немонотонною характеристикою, його передавальна характеристика також може мати немонотонний характер. У цьому разі при плавній зміні вхідного сигналу можлива дискретна (стрибкоподібна) зміна вихідного сигналу.

Метод проєкцій дозволяє:

- 1) побудувати форму вихідного сигналу за відомою формою вхідного;
- 2) побудувати форму вхідного сигналу за відомою формою вихідного сигналу;
- 3) побудувати графік передавальної характеристики ланцюга за відомою формою вхідного та вихідного сигналу.

Для нелінійних ланцюгів змінного струму, як і будь-яких інших ланцюгів, справедливі закони Кірхгофа, причому вони виконуються у будь-який момент часу. Це дає змогу визначити форму струмів та напруг в елементах ланцюга за відомою формою струму або напруги на його вході та виході (рис. 4. 6.)

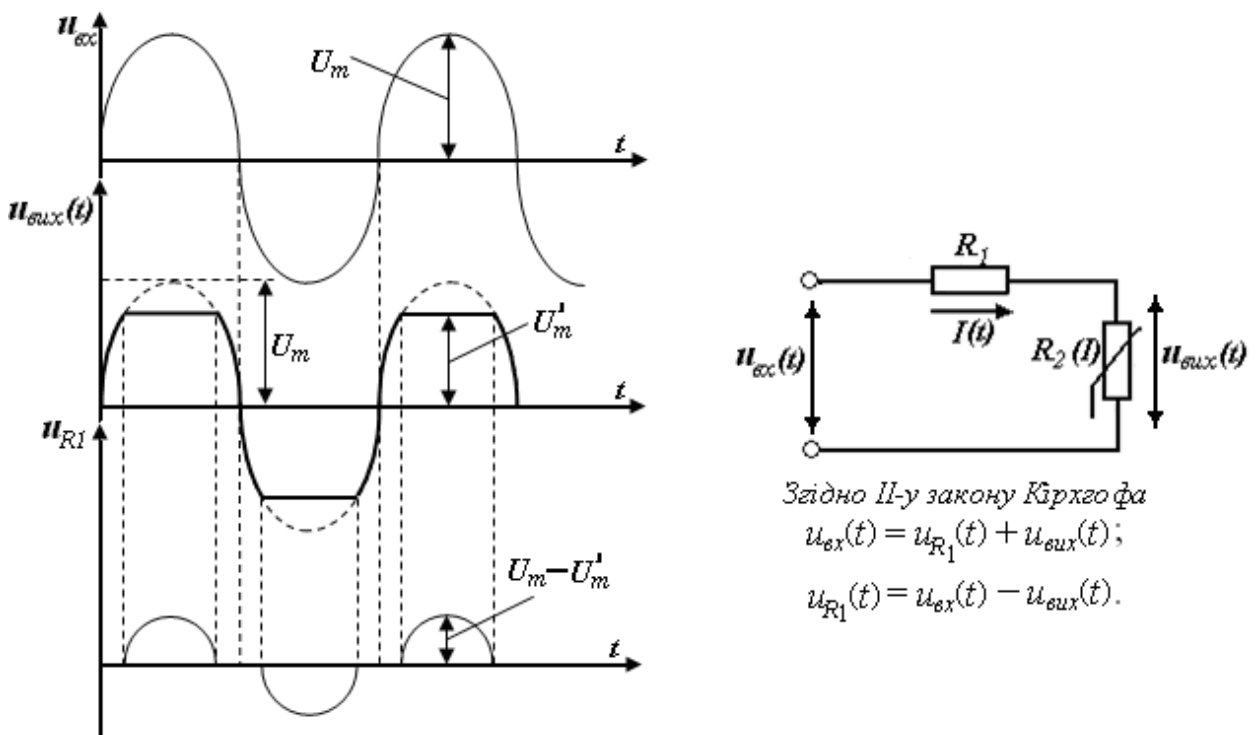


Рис. 4.6.

Оскільки форма струмів та напруг в елементах нелінійного ланцюга відрізняється від форми вхідної напруги, можна зробити висновок, що нелінійні ланцюги змінюють спектр вхідного сигналу, тобто у вихідному сигналі з'являються нові гармоніки, які були відсутні у спектрі вхідного

сигналу. Частоти цих гармонік можуть бути як кратними, так і не кратними відносно до частоти вхідного сигналу.

Ця властивість нелінійних ланцюгів широко використовується при їх практичному застосуванні.

Нелінійні ланцюги дають можливість реалізувати цілий ряд пристроїв, які не можуть бути реалізовані при використанні лише лінійних елементів. Так, на основі кремнієвих стабілітронів будують параметричні стабілізатори напруги, схему яких розглянуто у попередній лабораторній роботі, мостові схеми порівняння, обмежувачі напруги та ряд інших схем. Здатність нелінійних елементів змінювати спектральний склад струмів та напруг широко застосовується при побудові таких пристроїв як випрямлячі, помножувачі частоти, модулятори, демодулятори, детектори. Сучасні електронні пристрої, за своєю суттю, є нелінійними електричними ланцюгами, а ті широкі можливості по перетворенню параметрів електричних сигналів, які вони забезпечують, пов'язані з наявністю в цих схемах нелінійних елементів – різних типів напівпровідникових приладів.

Наприклад, у найпростішому однофазному випрямлячі напруга u на вході випрямляча синусоїдальна (рис. 4. 7, а), а напруга u_H на його виході (на навантаженні) вже несинусоїдальна. Форма u_H для однонапівперіодного випрямляча показано на рис. 4. 7, б, а для двонапівперіодного випрямляча – на рис. 4. 7. в.

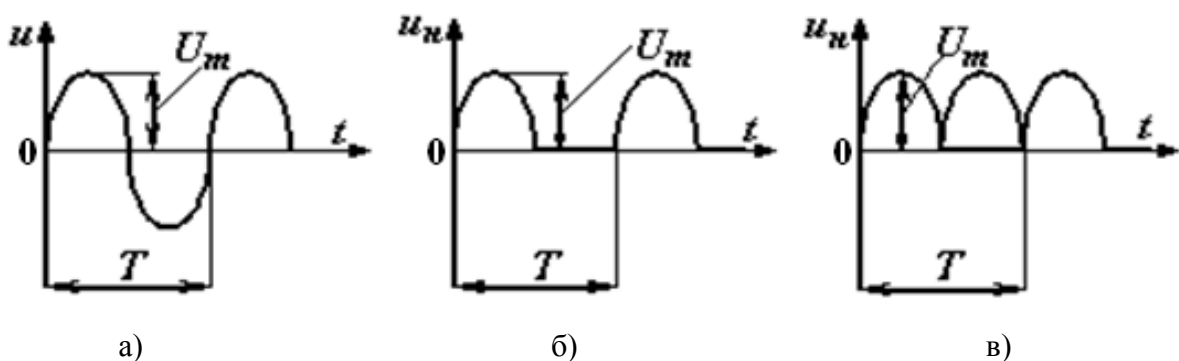


Рис. 4. 7.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У RC - ЛАНЦЮГАХ

МЕТА РОБОТИ: Дослідити перехідні процеси в електричному ланцюзі, що містить конденсатор. Визначити основні параметри перехідного процесу та оцінити вплив параметрів елементів ланцюга на характеристики перехідного процесу. Провести аналітичний розрахунок параметрів перехідного процесу та порівняти одержані результати з експериментальними.

ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Скласти електричний ланцюг, згідно з варіантом (рис. 5.1).

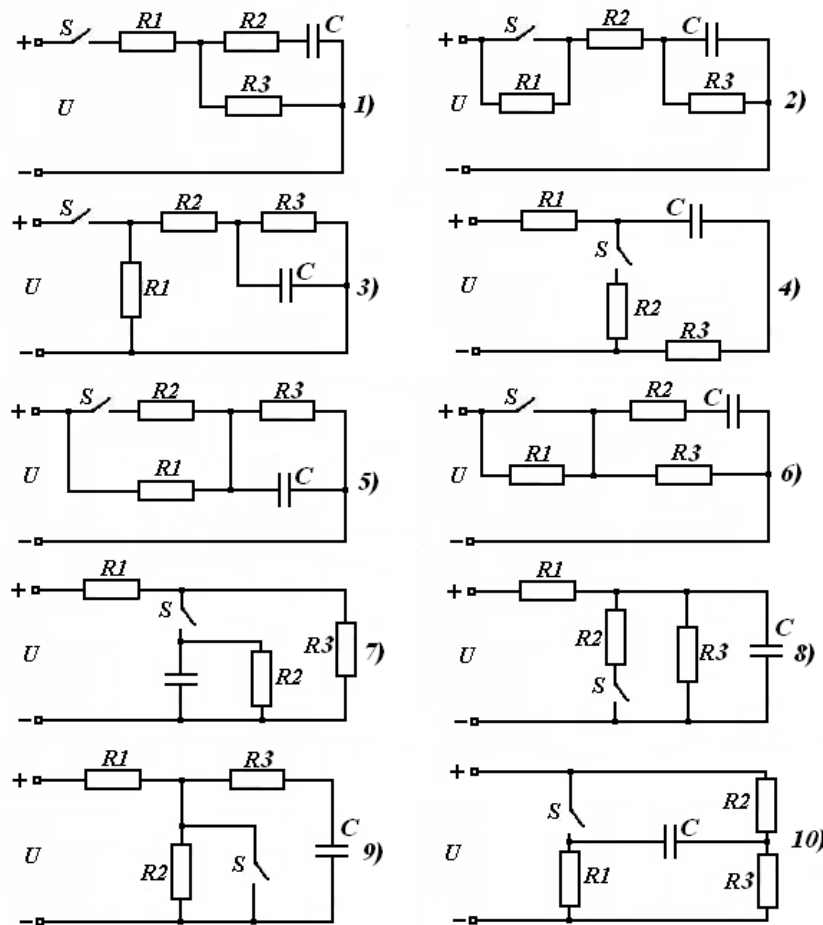


Рис. 5.1

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

В якості перемикача S використати контакти електронного ключа, який розташований в блоці змінної напруги (БЗН). Перемикач “Синхронізація” електронного ключа встановити у положення “Внутр.”. В якості резисторів R_1, R_2, R_3 та конденсатора C використовувати елементи набірного поля. Ємність конденсатора C 1 ... 2 мкФ.

2. Подати на вхід схеми від джерела сталої напруги (ДСН) напругу $U = (10 \dots 20)$ В. За допомогою відкаліброваного осцилографа спостерігати перехідний процес на конденсаторі C . Змінюючи опори резисторів R_1, R_2, R_3 домогтися того, щоб тривалість перехідного процесу складала 0,3 ... 0,5 тривалості замкнутого та розімкнутого стану ключа S .

Визначити остаточні параметри елементів електричного ланцюга та замалювати у масштабі напругу на конденсаторі в перехідному режимі $u_C(t)$. Параметри елементів ланцюга занести до табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$C, \text{ мкФ}$	$U, \text{ В}$

3. Використовуючи осцилограму $u_C(t)$, визначити сталі часу ланцюга при замиканні τ_3 та розмиканні τ_p ключа S та розрахувати тривалість відповідного перехідного процесу $t_{n.n.3}, t_{n.n.p}$. Отримані результати занести до табл. 5.2.

4. Не змінюючи режим роботи ланцюга, спостерігати на екрані осцилографа форму напруг на резисторах R_1, R_2, R_3 . Замалювати осцилограми напруг $u_{R1}(t), u_{R2}(t)$ та $u_{R3}(t)$. По одній з осцилограм, вказаній викладачем, графічно визначити сталі часу ланцюга τ_3 та τ_p , та порівняти з результатами п.3. Отримані результати занести до табл. 5.2.

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

5. Розрахувати аналітично сталу часу електричного ланцюга при замиканні та розмиканні ключа τ_3 та τ_p , а також тривалість перехідного процесу $t_{n.n.3}$, $t_{n.n.p}$. Отримані результати занести до табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

	Стала часу		Тривалість перехідного процесу	
	Замикання ключа, τ_3	Розмикання ключа, τ_p	Замикання ключа, $t_{n.n.3}$	Розмикання ключа, $t_{n.n.p}$
По осцилограмі $u_C(t)$				
По осцилограмі напруги на опорі u_{R1}, u_{R2}, u_{R3}				
Розрахунок				

6. Записати аналітичний вираз для перехідної напруги на одному з елементів ланцюга (вказаному викладачем) $u_{R1}(t)$, $u_{R2}(t)$, $u_{R3}(t)$, $u_C(t)$, визначивши початкове $u(0_+)$ та усталене значення напруги $u(\infty)$. Отримані результати занести до табл. 5.3.

Таблиця

5.3.

Замикання ключа		Розмикання ключа	
Початкове значення напруги, В	Усталене значення напруги, В	Початкове значення напруги, В	Усталене значення напруги, В
$u(0_+) =$	$u(\infty) =$	$u(0_+) =$	$u(\infty) =$
Аналітичний вираз напруги на заданому елементі		Аналітичний вираз напруги на заданому елементі	
$u(t) =$		$u(t) =$	

7. Порівняти результати аналітичних розрахунків з експериментальними даними.
8. Зробити висновки по роботі.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Дати визначення перехідного та усталених режимів роботи електричного кола.
2. В яких електричних колах і за яких умов виникають перехідні процеси?
3. Що таке вільна та усталена складові струму та напруги? Як вони визначаються, їх фізична суть.
4. Що таке вимушений струм та напруга? Як вони визначаються, їх фізична суть.
5. Сформулювати закон комутації для ланцюгів з конденсатором. Дати пояснення закону.
6. Що таке початкові умови (нульові та ненульові) перехідного процесу? Як їх визначають?
7. Які початкові умови називають незалежними, а які залежними?
8. Як визначають сталі інтегрування при розрахунку перехідних струмів та напруг?
9. Яку фізичну суть має стала часу електричного кола та від чого вона залежить?
10. Як визначити тривалість перехідного процесу та від чого вона залежить?
11. Як визначають початкові значення струмів та напруг в елементах електричного ланцюга?

12. Як визначають усталені значення струмів та напруг в елементах електричного ланцюга?

13. Як визначають сталу часу електричного ланцюга при замиканні та розмиканні ключа?

14. Як протікає перехідний процес при підключенні конденсатора до джерела з постійною ЕРС?

15. Обґрунтувати неможливість стрибкоподібної зміни напруги на конденсаторі при перехідних процесах.

16. Сформулюйте методику розрахунку перехідного процесу в елементах електричного ланцюга без розв'язання диференційного рівняння.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У процесі роботи в реальних електричних ланцюгах періодично відбуваються комутації – підключення або відключення окремих елементів, гілок, або ділянок електричного ланцюга. Внаслідок комутацій відбувається зміна параметрів елементів ланцюга, або джерел електричної енергії. При цьому режими роботи елементів ланцюга (струми та напруги) змінюються. Якщо ланцюг складається тільки з резистивних елементів, зміна їх режиму після комутації відбувається практично миттєво. Якщо ж ланцюг містить реактивні елементи, зміна режиму їх роботи буде відбуватися поступово. Це пов'язано з тим, що при комутаціях відбувається зміна запасів електромагнітної енергії в реактивних елементах на якусь величину Δw . Оскільки комутація відбувається практично миттєво ($\Delta t_{\text{комут.}} \rightarrow 0$), для того, щоб у момент комутації енергія конденсатора змінилася на величину Δw , джерело енергії повинно було б мати необмежену потужність

$P = \frac{dw}{dt} = \frac{\Delta w}{\Delta t_{\text{комут}}} \rightarrow \infty$. Потужність реальних джерел енергії завжди обмежена,

тому запас енергії в конденсаторі після комутації змінюється поступово.

Енергія, яку накопичує конденсатор $W_C = \frac{CU_C^2}{2}$, залежить від його ємності C

та прикладеної напруги U_C .

У будь яких ланцюгах при будь яких комутаціях завжди виконуються закони комутації.

Закон комутації. На ємнісному елементі напруга u_C . (заряд q_C) не можуть змінюватися стрибкоподібно, тобто безпосередньо після комутації вони зберігають ті значення, які були безпосередньо перед комутацією:

$$u_{C(0+)} = u_{C(0)} = u_{C(0-)};$$

$$q_{C(0+)} = q_{C(0)} = q_{C(0-)}.$$

Таким чином напруга на ємності завжди змінюється поступово, а у момент комутації зберігає те значення, яке було безпосередньо перед комутацією.

Перехід електричного ланцюга від одного робочого режиму до іншого називають перехідним процесом. Чисельні значення струму індуктивності та напруги на ємності перед комутацією називають початковими умовами перехідного процесу.

Для розрахунку перехідного процесу треба знати:

- схему електричного ланцюга;
- параметри його елементів;
- початкові умови.

Знання початкових умов є обов'язковим, причому не має ніякого значення, яким чином ці умови були створені.

Для розрахунку перехідного процесу треба скласти та розв'язати диференціальне рівняння, що описує процеси у ланцюзі після комутації.

Диференціальне рівняння електричного ланцюга можна розв'язати будь-яким відомим методом. У теорії електричних ланцюгів найбільш широке застосування мають класичний та операторний методи розрахунку перехідних процесів.

Для спрощення розрахунків класичним методом перехідний процес розглядають як результат накладання двох процесів:

- вимушеного, який виникає внаслідок дії зовнішніх джерел енергії;
- вільного, який виникає під дією внутрішніх запасів енергії ланцюга, накопичених у реактивних елементах. Тобто, струм і напруга в елементі кола в перехідному режимі

$$i_{\text{пер}}(t) = i_{\text{вим}}(t) + i_{\text{віль}}(t);$$

$$u_{\text{пер}}(t) = u_{\text{вим}}(t) + u_{\text{віль}}(t),$$

де $i_{\text{вим}}(t)$, $u_{\text{вим}}(t)$ – вимушена складова струму і напруги;

$i_{\text{віль}}(t)$, $u_{\text{віль}}(t)$ – вільна складова струму і напруги.

Як приклад, розглянемо методику знаходження напруги на конденсаторі C при його підключенні до джерела постійної EPC (рис. 5.2).

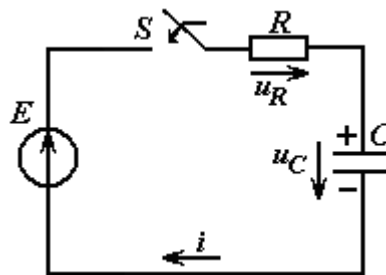


Рис. 5.2

Будемо вважати, що до замикаання ключа S конденсатор був не заряджений, тобто маємо нульові початкові умови

$$q_C(0_-) = 0,$$

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

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

У результаті комутації ключ S замкнувся і утворився замкнутий контур. Складемо для нього рівняння за другим законом Кірхгофа

$$u_R + u_C = E,$$

або, враховуючи, що $u_R = Ri$ і $i = C \frac{du_C}{dt}$, одержимо

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E.$$

Рішення шукаємо у вигляді суми двох складових

$$u_C = u_{C_{вим}} + u_{C_{вільн}}.$$

Для вимушеної напруги маємо неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку

$$RC \frac{du_{C_{вим}}}{dt} + u_{C_{вим}} = E.$$

Оскільки коло підключається до джерела постійної напруги E , то всі вимушені електричні величини (у тому числі і напруга на ємнісному елементі) будуть також постійні. Тому

$$\frac{du_{C_{вим}}}{dt} = 0,$$

тобто, резистивний елемент не впливає на значення вимушеної складової напруги на ємнісному елементі:

$$u_{C_{вим}} = E.$$

Для визначення вільної складової напруги на конденсаторі маємо однорідне диференціальне рівняння першого порядку

$$RC \frac{du_{C_{вільн}}}{dt} + u_{C_{вільн}} = 0.$$

Йому відповідає алгебраїчне характеристичне рівняння

$$pRC + 1 = 0.$$

Корінь цього рівняння

$$p = -\frac{1}{RC}.$$

Отже, вільна складова напруги на конденсаторі має вигляд

$$u_{C_{віль}} = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{1}{RC}t},$$

де A – стала інтегрування; e – основа натурального логарифма, p – корінь характеристичного рівняння.

Отже, напруга на конденсаторі в перехідному режимі

$$u_C(t) = u_{C_{вим}}(t) + u_{C_{віль}}(t) = E + Ae^{pt}.$$

До комутації при $t = (0_-)$ конденсатор не був заряджений $u_C(0_-) = 0$.

За законом комутації безпосередньо після замикання ключа напруга на ємнісному елементі зберігає своє значення

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

При $t = (0_+)$ маємо

$$0 = E + A.$$

Звідси

$$A = -E.$$

Отже, перехідна напруга на конденсаторі

$$u_C(t) = E - Ee^{pt} = E - Ee^{-\frac{1}{RC}t}.$$

Струм у контурі

$$i(t) = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left(E - Ee^{-\frac{1}{RC}t} \right) = \frac{E}{R} e^{-\frac{1}{RC}t}.$$

Напруга на резистивному елементі R

$$u_R(t) = Ri = R \frac{E}{R} e^{-\frac{1}{RC}t} = Ee^{-\frac{1}{RC}t}.$$

Як бачимо, з часом напруга на ємнісному елементі зростає, наближаючись до вимушеного значення E , а напруга на резистивному елементі (і струм у колі) спадає за аперіодичним законом до нуля.

Графіки зміни напруг у колі з резистивним та ємнісним елементами зображено на рис. 5.3.

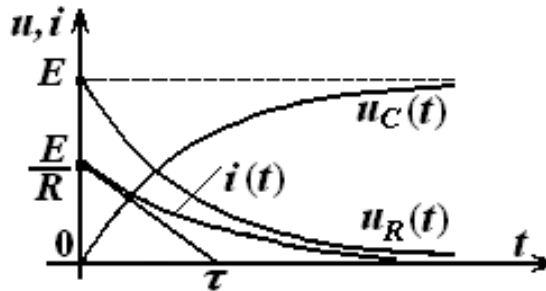


Рис.5.3

Величина $\tau = \frac{1}{|p|} = RC$ має розмірність часу і називається сталою часу електричного ланцюга. Це час, протягом якого вільна складова перехідного процесу зменшується в $e \approx 2,718$ разів у порівнянні зі своїм початковим значенням $i_{віль}(0_+)$.

$$i_{віль}(\tau) = i_{віль}(0_+)e^{-1} = \frac{i_{віль}(0_+)}{e} = \frac{A}{e}.$$

Стала часу τ може бути визначена графічно. Для цього треба провести дотичну до графіку струму або напруги u_R в точці, що відповідає моменту часу $t = 0$ (момент комутації) та продовжити її до перетину вісню часу.

Величина, зворотна сталій часу, називається коефіцієнтом загасання

$$\alpha = \frac{1}{\tau}.$$

Новий усталений режим встановлюється тим повільніше, чим більшою є стала часу τ або чим менший коефіцієнт затухання α .

Перехідний процес теоретично триває нескінченно довго. Практично вважають, що через $t = (3 \dots 5)\tau$ перехідний процес закінчується.

Якщо зовнішнє джерело енергії виробляє струм або напругу, що має періодичний характер (зокрема сталий струм або напругу), вимушений режим також буде мати періодичний характер. При цьому такий вимушений режим називають усталеним. Однак, треба завжди пам'ятати, що реально в елементах ланцюга під час перехідного процесу має місце єдиний перехідний режим, а його розкладання на вимушену та вільну складові є зручним прийомом, що спрощує розрахунки. Очевидно, що така методика розрахунку, пов'язана із застосуванням методу накладання, може застосовуватися тільки у тих випадках, коли електричний ланцюг після комутації є лінійним.

У найпростіших випадках, коли електричний ланцюг містить лише один реактивний елемент (конденсатор або котушку індуктивності), і будь-яку кількість резистивних елементів, перехідний режим можна розрахувати не складаючи та не розв'язуючи диференційне рівняння. Аналітичний вираз, що описує перехідний процес у таких випадках можна записати одразу в наступному вигляді:

$$i_{\text{пер}}(t) = i(\infty) + [i(0) - i(\infty)] e^{-t/\tau}; \quad (*)$$

$$u_{\text{пер}}(t) = u(\infty) + [u(0) - u(\infty)] e^{-t/\tau}, \quad (**)$$

де $i(\infty)$, $u(\infty)$ – струм та напруга на елементі в усталеному режимі (при $t \rightarrow \infty$); $i(0)$, $u(0)$ – струм та напруга на елементі в момент комутації (початкові умови в момент $t = 0_+$); τ - стала часу електричного ланцюга після комутації.

Для визначення сталої часу ланцюга τ треба:

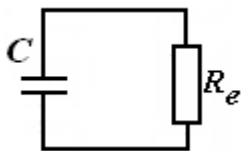


Рис. 5.4.

- замкнути джерела напруги і розірвати гілки з джерелами струму;

- методом еквівалентних перетворювань замінити резистивні елементи, що включені відносно ємності їх

еквівалентним опором R_e .

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

При цьому схема ланцюга, в якому є ємність, приводиться до найпростішого вигляду (рис. 5.4).

Стала часу τ визначають відповідно як $\tau = C R_e$.

Приклад: Визначити перехідний режим елементів ланцюга (рис. 5.5) при замиканні ключа S .

Струм та напруга на елементах описується відповідно формулами (*) та (**). Значення початкових та усталених струмів та напруг в елементах зведені до таблиці.

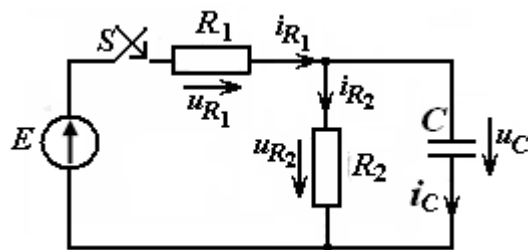


Рис. 5.5.

Параметр режиму Елемент	$i(0)$	$u(0)$	$i(\infty)$	$u(\infty)$
R_1	E/R_1	E	$E/(R_1+R_2)$	$\frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_2}$
R_2	0	0	$E/(R_1+R_2)$	$\frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2}$
C	E/R_1	0	0	$\frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

Правильність заповнення таблиці можна перевірити застосовуючи закони Кірхгофа.

Стала часу ланцюга після замикання ключа $\tau = C R_e$, де $R_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

Визначення режиму роботи елементів доцільно починати з визначення напруги на конденсаторі, а закінчувати - визначенням струму через конденсатор.

Використовуючи аналітичні вирази струмів та напруг будують їх графіки (рис. 5.6). Після побудови графіків, треба перевірити, чи виконуються графічно закони Кірхгофа.

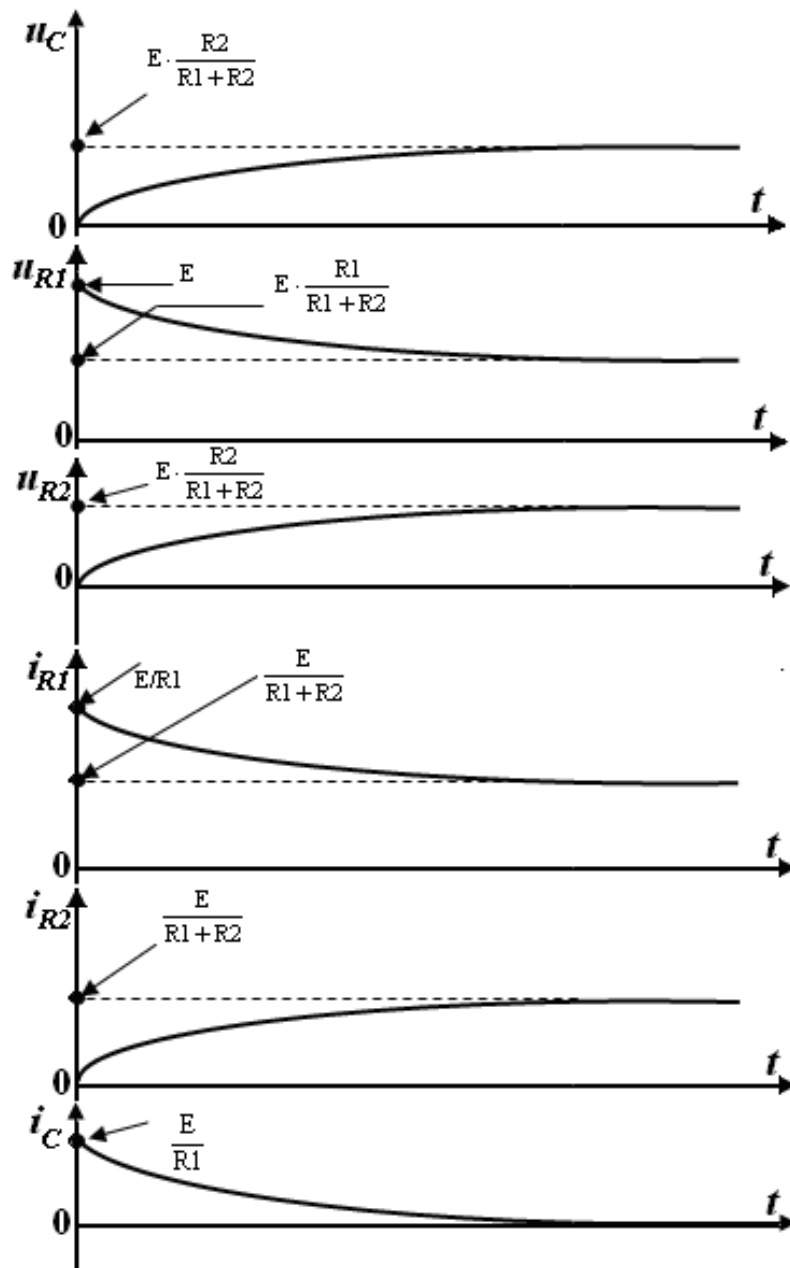


Рис. 5.6

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У RL - ЛАНЦЮГАХ

МЕТА РОБОТИ: Дослідити перехідні процеси в електричному ланцюзі, що містить котушку індуктивності. Визначити основні параметри перехідного процесу та оцінити вплив параметрів елементів ланцюга на його характеристики. Провести аналітичний розрахунок процесів та порівняти одержані результати з експериментальними.

ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Скласти електричний ланцюг відповідно до номеру варіанта (рис. 6.1, а, б): схема а) - номер варіанта непарний, схема б) - номер варіанта парний.

В табл. 6.1. наведені параметри індуктивності L .

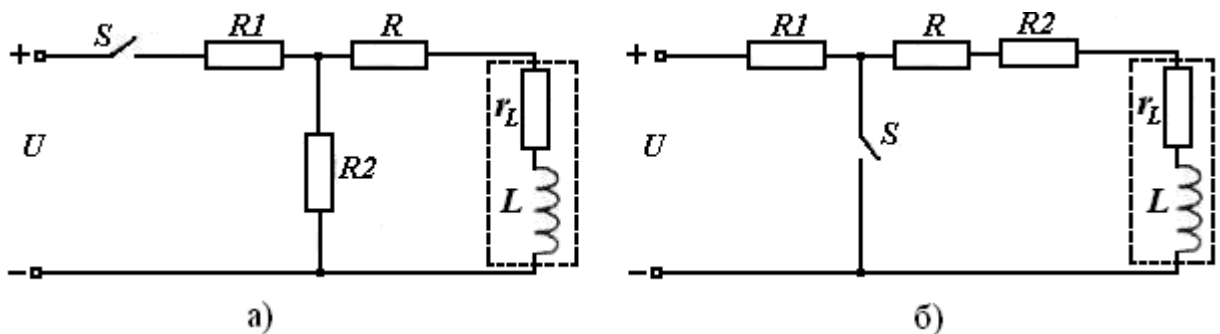


Рис. 6.1

Таблиця 6.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Індуктивність L , мГн	90	90	80	80	70	70	60	60	50	50

2. Як перемикач S використати контакти електронного ключа, який розташований в блоці змінної напруги (БЗН). Перемикач "Синхронізація" електронного ключа встановити у положення "Внутр." Індуктивність L встановити за допомогою блока змінної індуктивності, а резистор R з опором 15 ... 30 Ом - за допомогою блока змінного опору. Цей резистор використовується для спостереження форми струму через індуктивність. Як резистори R_1 та R_2 використовувати елементи набірної плати.

Подати на вхід схеми від джерела сталої напруги ДСН напругу $U = (5 \dots 15)$ В. За допомогою відкаліброваного осцилографа спостерігати на екрані форму струму через індуктивність (напругу на резисторі R). Змінюючи опори резисторів R_1 та R_2 домогтись того, щоб тривалість перехідного процесу складала 0,3 ... 0,5 тривалості замкненого та розімкненого стану ключа S . Уточнити і записати значення параметрів усіх елементів електричного ланцюга. Замалювати у масштабі форму струму через індуктивність у перехідному режимі $i_L(t)$.

3. Використовуючи осцилограму струму $i_L(t)$, визначити сталу часу ланцюга при замиканні τ_3 та розмиканні τ_P ключа S . Розрахувати тривалість перехідного процесу при замиканні $t_{n.n.3}$ та розмиканні $t_{n.n.P}$ ключа S .

4. Не змінюючи режиму роботи ланцюга, спостерігати на екрані осцилографа форму напруги на резисторах R_1 , R_2 та напругу на індуктивності u_L . По одній з цих осцилограм, вказаній викладачем, графічно визначити сталу часу ланцюга τ_3 та τ_P та занести її значення до табл. 6.2. Порівняти результати з одержаними в п. 3.

5. Пояснити наявність сталої складової напруги на індуктивності. Використовуючи осцилограми напруги на індуктивності $u_L(t)$, а також струму через індуктивність $i_L(t)$, визначити активний опір котушки r_L за законом Ома:

$$r_L = u_{L=} / i_{L=},$$

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

де $u_{L=}, i_{L=}$ - усталене значення напруги та струму в котушці після загасання перехідного процесу.

Таблиця 6.2.

	Стала часу		Тривалість перехідного процесу	
	Замикання ключа, τ_z	Розмикання ключа, τ_p	Замикання ключа, $t_{n.n.z}$	Розмикання ключа, $t_{n.n.p}$
По осцилограмі $i_L(t)$				
По осцилограмі u_{R1}, u_{R2}, u_L				
Розрахунок				

6. Розрахувати аналітично сталу часу електричного ланцюга при замиканні та розмиканні ключа, а також тривалість перехідного процесу (з урахуванням опору індуктивності r_L). Отримані результати занести до табл. 6.2.

7. Записати аналітичний вираз для перехідного процесу на одному з елементів ланцюга (вказану викладачем) $u_{R1}(t), u_{R2}(t), u_L(t), i_L(t)$ визначивши початкове $u(0_+), i(0_+)$ та усталене значення напруги або струму $u(\infty), i(\infty)$. В аналітичних виразах врахувати активний опір котушки r_L . Результати розрахунку занести до табл. 6.3.

8. Порівняти результати аналітичних розрахунків з експериментальними даними.

9. Зробити висновки по роботі.

Замикання ключа		Розмикання ключа	
Початкове значення напруги (струму)	Усталене значення напруги (струму)	Початкове значення напруги	Усталене значення напруги
$u(0_+) =$	$u(\infty) =$	$u(0_+) =$	$u(\infty) =$
$i(0_+) =$	$i(\infty) =$	$i(0_+) =$	$i(\infty) =$
Аналітичний вираз напруги та струму на заданому елементі		Аналітичний вираз напруги та струму на заданому елементі	
$u(t) =$		$u(t) =$	
$i_L(t) =$		$i_L(t) =$	

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Дати визначення перехідного та усталеного режимів роботи електричного кола.
2. В яких електричних колах і за яких умов виникають перехідні процеси?
3. Що таке вільна та усталена складова струму та напруги? Як вони визначаються, їх фізичний зміст?
4. Що таке вимушений струм та напруга? Як вони визначаються, їх фізичний зміст?
5. Сформулюйте закон комутації для ланцюгів з котушкою індуктивності та поясніть особливості його застосування.
6. Що таке початкові умови (нульові та ненульові) перехідного процесу? Як їх визначають?
7. Які початкові умови називають незалежними, а які залежними?
8. Як визначають сталі інтегрування при розрахунку перехідних струмів та напруг?

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

9. Який фізичний зміст сталої часу електричного кола та від чого вона залежить?
10. Від чого залежить тривалість перехідного процесу та як її визначити?
11. Як визначають початкові значення струмів та напруг в елементах електричного ланцюга?
12. Як визначають усталені значення струмів та напруг в елементах електричного ланцюга?
13. Як визначають сталу часу електричного ланцюга при замиканні та розмиканні ключа?
14. Особливості протікання перехідних процесів при підключенні котушки індуктивності до джерела з постійною ЕРС?
15. Обґрунтуйте неможливість стрибкоподібної зміни струму в котушці індуктивності при перехідних процесах?
16. Сформулюйте методику розрахунку перехідного процесу в елементах електричного ланцюга без розв'язання диференційного рівняння.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Якщо електричний ланцюг містить котушку індуктивності зміна режиму роботи елементів буде відбуватися поступово. Це пов'язано з тим, що при зміні режиму роботи ланцюга відбувається зміна запасів електромагнітної енергії в котушці на величину Δw . Оскільки комутація відбувається практично миттєво ($\Delta t_{\text{комут}} \rightarrow 0$), для того, щоб у момент комутації енергія котушки змінилася на величину Δw , джерело енергії повинно було б мати необмежену потужність $P = \frac{dw}{dt} = \frac{\Delta w}{\Delta t_{\text{комут}}} \rightarrow \infty$. Потужність реальних джерел енергії завжди

обмежена, тому запас енергії в котушці після комутації змінюється поступово.

Енергія, яку накопичує котушка індуктивності при протіканні струму I $W_L = \frac{LI^2}{2}$. У будь яких ланцюгах при будь яких комутаціях завжди виконується закон комутації.

Закон комутації. В індуктивному елементі струм i_L (та магнітний потік Φ) не можуть змінюватися стрибкоподібно і у момент комутації зберігає те значення, яке було безпосередньо перед комутацією:

$$i_{L(0+)} = i_{L(0)} = i_{L(0-)};$$
$$\Phi_{L(0+)} = \Phi_{L(0)} = \Phi_{L(0-)}.$$

Таким чином струм через котушку індуктивності завжди змінюється поступово, а у момент комутації зберігають те значення, яке було безпосередньо перед комутацією.

Перехід електричного ланцюга від одного робочого режиму до іншого називають перехідним процесом. Чисельне значення струму котушки індуктивності безпосередньо перед комутацією називають початковими умовами перехідного процесу.

Для розрахунку перехідного процесу треба знати:

- схему електричного ланцюга;
- параметри його елементів;
- початкові умови.

Знання початкових умов є обов'язковим, причому не має ніякого значення, яким чином ці умови були створені.

Для розрахунку перехідного процесу треба скласти та розв'язати диференціальне рівняння, що описує процеси у ланцюзі після комутації. Диференціальне рівняння електричного ланцюга можна розв'язати будь-яким відомим методом. У теорії електричних ланцюгів найбільш широке

застосування має класичний та операторний метод розрахунку перехідних процесів.

Для спрощення розрахунків класичним методом перехідний процес розглядають як результат накладання двох процесів:

- вимушеного, який виникає внаслідок дії зовнішніх джерел енергії.
- вільного, який виникає під дією внутрішніх запасів енергії ланцюга, накопичених у реактивних елементах. Тобто, струм і напруга в елементі кола в перехідному режимі

$$i_{\text{пер}}(t) = i_{\text{вим}}(t) + i_{\text{віль}}(t);$$

$$u_{\text{пер}}(t) = u_{\text{вим}}(t) + u_{\text{віль}}(t).$$

Як приклад, розглянемо методику знаходження струму в котушці індуктивності при її підключенні до джерела постійної ЕРС (рис. 6.2).

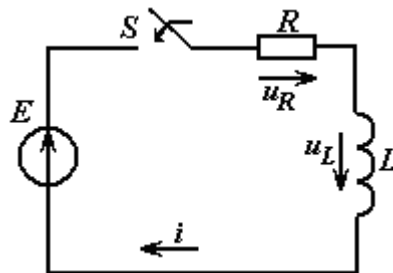


Рис. 6.2

До комутації струм у електричному колі (у котушці індуктивності) був відсутній, тому що ключ S був розімкнутий $i(0_-) = 0$.

У результаті комутації ключ S замкнувся і утворився замкнутий контур. Складемо для нього рівняння за другим законом Кірхгофа

$$u_R + u_L = E.$$

Виразивши напруги через струм i , одержимо

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

Рішення шукаємо у вигляді суми двох складових: вимушеної та вільної

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

$$i = i_{\text{вим}} + i_{\text{віль}}.$$

Для визначення вимушеного струму складаємо неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку

$$Ri_{\text{вим}} + L \frac{di_{\text{вим}}}{dt} = E.$$

Оскільки коло підключається до джерела постійної напруги, то усталений струм також буде постійний. Тому

$$\frac{di_{\text{вим}}}{dt} = 0.$$

Отже, індуктивний елемент не впливає на значення усталеного постійного струму:

$$i_{\text{вим}} = I = \frac{E}{R}.$$

Для визначення вільної складової струму складаємо однорідне диференціальне рівняння першого порядку

$$Ri_{\text{віль}} + L \frac{di_{\text{віль}}}{dt} = 0.$$

Його характеристичне рівняння

$$R + Lp = 0.$$

Корінь цього рівняння

$$p = -\frac{R}{L}.$$

Отже, вільна складова перехідного струму має вигляд

$$i_{\text{віль}}(t) = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{R}{L}t},$$

де A – стала інтегрування, e – основа натурального логарифма, p – корінь характеристичного рівняння.

Отже, струм котушки індуктивності в перехідному режимі

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

$$i(t) = i_L(t) = i_{L\text{вим}}(t) + i_{L\text{віл}}(t) = \frac{E}{R} + Ae^{pt}.$$

До комутації при $t = (0_-)$ струм у колі був відсутній. За законом комутації безпосередньо після замикання ключа у гілці з індуктивним елементом струм зберігає попереднє значення, тому

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

Отже, для $t = (0_+)$ маємо

$$0 = \frac{E}{R} + A.$$

Звідси

$$A = -\frac{E}{R}.$$

Отже,

$$i(t) = i_L(t) = \frac{E}{R} - \frac{E}{R}e^{pt} = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right).$$

ЕРС самоіндукції котушки

$$e = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d}{dt} \left(\frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \right) = -E e^{-\frac{R}{L}t}.$$

У початковий момент $t = (0_+)$ *ЕРС* самоіндукції повністю компенсує *ЕРС* джерела ($e = -E$), тому що струм $i(0_+) = 0$ і $u_R(0_+) = Ri(0_+) = 0$.

З часом *ЕРС* самоіндукції зменшується, а спад напруги на резистивному елементі (і струм у електричному колі) зростає за аперіодичним законом, наближаючись до усталеного значення. Графіки зміни миттєвих значень струму та напруг у колі з резистивним та індуктивним елементом зображено на рис. 6.3, а, б.

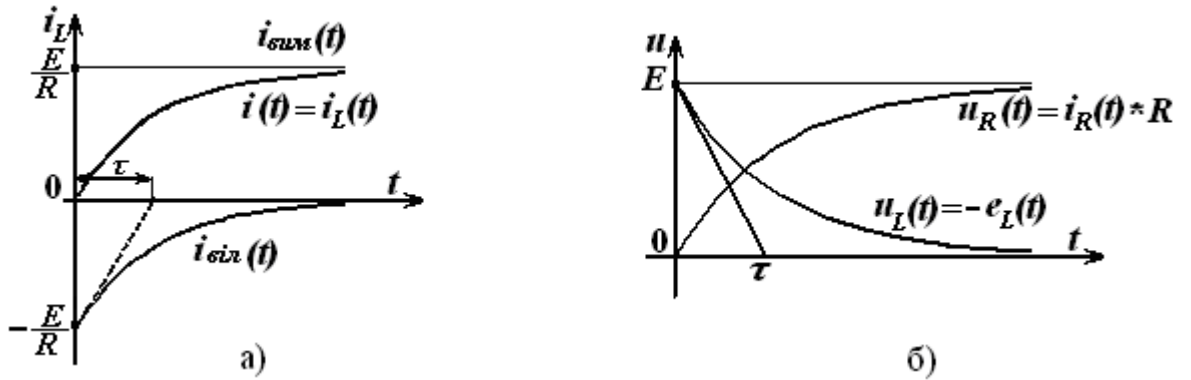


Рис. 6.3

Величина $\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{L}{R}$ має розмірність часу і називається сталою часу.

Це час, протягом якого вільна складова перехідного процесу зменшується в $e \approx 2,718$ разів у порівнянні зі своїм початковим значенням $i_{sil}(0_+)$.

$$i_{sil}(\tau) = i_{sil}(0_+)e^{-1} = \frac{i_{sil}(0_+)}{e} = \frac{A}{e}.$$

Стала часу може бути визначена графічно (рис. 6. 3). Для цього необхідно провести дотичну до кривої $i_{sil}(t)$ в точці, що відповідає довільному моменту часу $t = t_1$ та продовжити її до перетину з віссю часу в точці $t = t_2$. Тоді стала часу $\tau = t_2 - t_1$. За звичай, як довільний момент часу вибирають момент часу $t = 0$.

У найпростіших випадках, коли електричний ланцюг містить лише одну котушку індуктивності і будь яку кількість резистивних елементів, перехідний режим можна розрахувати не складаючи та не розв'язуючи диференційне рівняння. Аналітичний вираз, що описує перехідний процес у таких випадках можна записати одразу в наступному вигляді:

$$i_{пер}(t) = i(\infty) + [i(0) - i(\infty)] e^{-t/\tau}; \quad (*)$$

$$u_{пер}(t) = u(\infty) + [u(0) - u(\infty)] e^{-t/\tau}, \quad (**)$$

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

де $i(\infty)$, $u(\infty)$ – струм та напруга на елементі в усталеному режимі (при $t \rightarrow \infty$); $i(0)$, $u(0)$ – струм та напруга на елементі в момент комутації (початкові умови в момент $t = 0_+$); τ - стала часу електричного ланцюга після комутації.

Для визначення сталої часу ланцюга τ треба:

- закортити джерела напруги і розірвати гілки з джерелами струму;

- методом еквівалентних перетворювань замінити резистивні елементи, що включені відносно індуктивності їх еквівалентним опором R_e .

При цьому схема ланцюга приводиться до найпростішого вигляду (рис. 6.4).

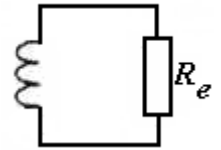


Рис. 6.4.

Стала часу τ визначається відповідно як $\tau = \frac{L}{R_e}$.

Приклад: Визначити перехідний режим елементів ланцюга при замиканні ключа S (рис. 6.5).

Струм та напруга на елементах описується, відповідно, формулами (*) та (**). Значення початкових та усталених струмів та напруг в елементах зведені до таблиці.

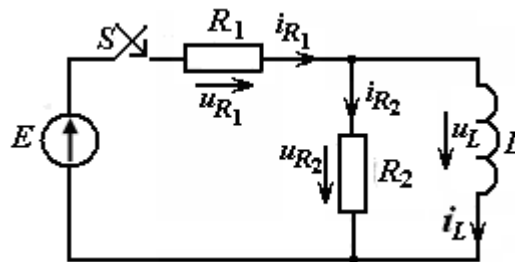


Рис. 6.5

Правильність заповнення таблиці можна перевірити застосовуючи закони Кірхгофа.

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
Методичні вказівки до лабораторних робіт

Параметр режиму Елемент	$i(0)$	$u(0)$	$i(\infty)$	$u(\infty)$
R_1	$E/(R_1 + R_2)$	$\frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_2}$	E/R_1	E
R_2	$E/(R_1 + R_2)$	$\frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2}$	0	0
L	0	$\frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2}$	E/R_1	0

Стала часу ланцюга після замикання ключа $\tau = L/R_e$, де $R_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

Визначення режиму роботи елементів доцільно починати з визначення струму через котушку індуктивності, а закінчувати - визначенням напруги на котушці індуктивності.

Використовуючи аналітичні вирази струмів та напруг будуюмо їх графіки (рис. 6.6).

Після побудови графіків, треба перевірити, чи виконуються графічно закони Кірхгофа.

Примітка.

При виконанні роботи і проведенні розрахунків треба пам'ятати, що на відміну від ідеального індуктивного елемента в реальній котушці індуктивності треба враховувати активний опір проводу котушки r_L . Тому схема заміщення котушки індуктивності складається з двох послідовно з'єднаних елементів: індуктивного L і резистивного r_L (рис. 6.1).

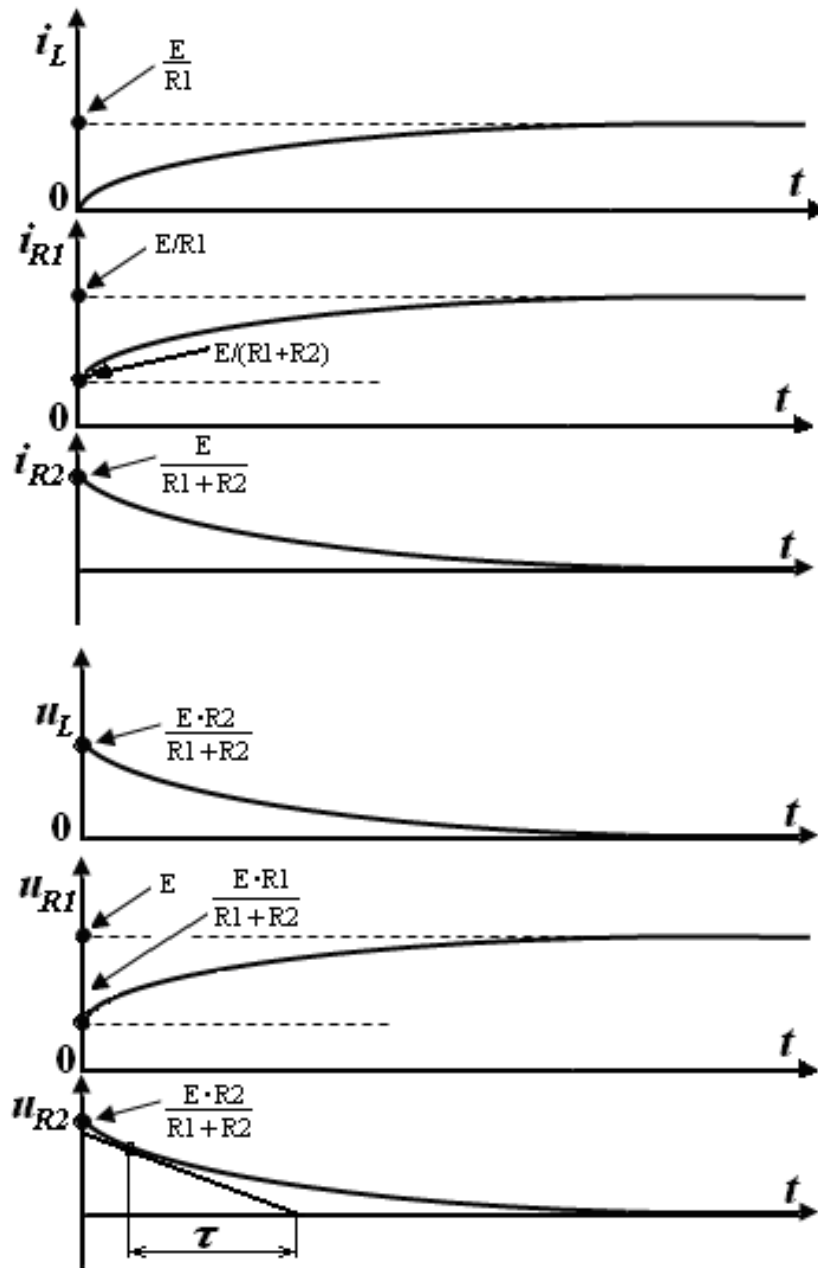


Рис. 6.6

ЛІТЕРАТУРА

1. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія електричних кіл». Частина II. – Нелінійні електричні кола.
2. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія електричних кіл». Частина III. – Перехідні процеси.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебн. для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. / Л. А. Бессонов. – 9 – е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая шк., 1996. – 638 с. Библиогр.: с. 632. – На пер. Теоретические основы электротехники. – 10 000 экз. – ISBN 5-06-002160-2.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник. / Л. А. Бессонов. – 11 - е изд., перераб. и доп. – М.: «Гардарики» 2007. – 701 с. Библиогр.: с. 695. – На пер. Теоретические основы электротехники. – 5 000 экз. – ISBN 5-8297 - 0046 - 8.
5. Нейман Л.В., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. учеб. для вузов. Том 1. - 3-е изд., перераб. и доп. / Л. В. Нейман, К. С. Демирчян. - Л.: Энергоиздат, Ленингр. Отд-ние, 1981. – 536 с. – На пер. Теоретические основы электротехники. – 60 000 экз.
6. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П.А. Ионкин., А. В. Нетушил и др. – Изд. 5-е, перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с. – Библиогр.: с. 513. – На пер. Основы теории цепей. 50 000 экз.
7. Попов В.П. Основы теории цепей / В. П. Попов. - М.: Высшая школа, 1985. - 496 с. – Библиогр.: с. 483. – На пер. Основы теории цепей. – 20 000 экз.
8. Данилов Л.В., Матханов П.Н., Филиппов Е.С. Теория нелинейных электрических цепей. – Л.: Энергоатомиздат. 1990.-

9. Жуйков В.Я. Перехідні процеси: навч. посіб. / В. Я Жуйков, В. Я. Ромашко. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 184 с. – Бібліогр.: с. 183 – 184. – 200 пр.

10. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / Под ред. П. А. Ионкина, - М.: Энергоиздат, 1982. – 767 с. – Библиогр.: с. 762. – На пер. Сборник задач и упражнений по ТОЭ. – 50 000 экз.

11. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / Под ред. Л. А. Бессонова, - М.: Высш. шк., 1980. - 472 с. – Библиогр.: с. 468. – На пер. Сборник задач по ТОЭ. – 67 000 экз.

12. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей: учеб. пособ. для электротехнич., радиотехнич. спец. вузов / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова.- Изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1990. - 544 с. – Библиогр.: с. 540. – На пер. Задачник по теории линейных электрических цепей. – 46 000 экз. – ISBN 5-06-000678-6.