

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
"Теоретичні основи електротехніки"
для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка" всіх форм навчання з використанням
програми "Electronics Workbench"
Частина 2

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" всіх форм навчання з використанням програми "Electronics Workbench". Частина 2. /Укл.: С.М. Тиховод, В.В. Козлов, В.О Волков, О.В. Набокова, І.О.Афанасьєва, Г.М. Романіченко, А.І. Кравець – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2021 р. – 62 с.

Укладачі: С.М. Тиховод, доцент, к.т.н.
В.В. Козлов, доцент, к.т.н.,
В.О Волков, доцент, к.т.н.,
О.В. Набокова, доцент
І.О.Афанасьєва, ст. викладач
Г.М. Романіченко, ст. викладач
А.І. Кравець ст. лаборант

Рецензент: С.М. Тиховод, доцент, д.т.н.

Відповідальний за випуск: В.В. Козлов, доцент, к.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри ТЗЕ
Протокол №2 від 10.02.21 р.

Затверджено
на засіданні
навчально-методичної комісії
електротехнічного факультету
Протокол № 3 від 20.02.21 р.

ЗМІСТ

Лабораторна робота №7 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧІВ ЗА СХЕМОЮ "ЗІРКА"	51
Лабораторна робота №8 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧІВ ЗА СХЕМОЮ "ТРИКУТНИК"	14
Лабораторна робота №9 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	23
Лабораторна робота №10 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З КОТУШКОЮ ІНДУКТИВНОСТІ	31
Лабораторна робота №11 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З КОНДЕНСАТОРОМ	40
Лабораторна робота №12 КОТУШКА ІНДУКТИВНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ	47
ЛІТЕРАТУРА	55

Лабораторна робота №7

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧІВ ЗА СХЕМОЮ "ЗІРКА"

Мета роботи: дослідити трифазне коло при з'єднанні приймачів за схемою "зірка" з нейтральним проводом і без нього в різних режимах роботи, придбати навички аналізу трифазних кіл за допомогою векторних діаграм.

7.1 Короткі теоретичні відомості

7.1.1 Основні визначення

Існують два основних способи з'єднання обмоток генераторів, трансформаторів та приймачів у трифазних електричних колах: "зіркою" та "трикутником". Схема з'єднання генератора та приймачів "зіркою" наведено на рис. 7.1.

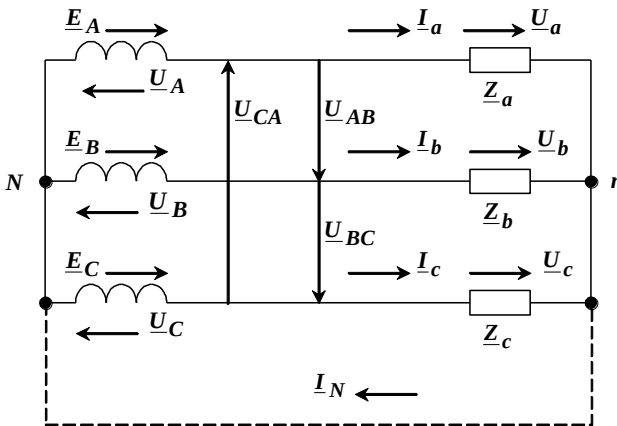


Рисунок 7.1 - Схема з'єднання фаз генератора та приймачів "зіркою"

При з'єднанні "зіркою" кінці фазних обмоток генератора з'єднуються в одну спільну точку. Аналогічно з'єднуються приймачі. Спільні точки генератора та приймачів мають назву нейтральних. Провід, що з'єднує нейтральні точки генератора та навантаження, називається нейтральним. Інші проводи, що з'єднують генератор та приймачі, називаються лінійними.

Розрізняють два види з'єднання "зірка": "зірка" без нейтрального проводу, або трипровідна "зірка" та "зірка" з нейтральним проводом, або чотирьохпровідна "зірка".

Напруги на затискачах обмоток окремих фаз генератора та навантаження називають фазними (відповідно фазні напруги генератора та фазні напруги на навантаженні). Напруга між нейтральними точками генератора та навантаження – напруга зміщення нейтралі. Напруги між лінійними проводами називають лінійними. Опори лінійних проводів у більшості випадків значно менші ніж опори приймачів, тому їх можна вважати близькими до нуля. З урахуванням цього відповідні лінійні напруги на затискачах генератора та навантаження дорівнюють одна одній.

Струм у нейтральному проводі називається нейтральним. Струми в окремих фазах обмоток генератора та навантаження мають назву фазних, а струми в лінійних проводах – лінійних. У випадку з'єднання "зіркою" лінійні струми дорівнюють фазним.

Загальноприйняті додатні напрямки струмів та напруг наведені на рис. 7.1.

7.1.2 Основні співвідношення

Трифазний генератор називається симетричним, якщо виконуються наступні умови: синусоїдні ЕРС мають однакові амплітуду E_m та кутову частоту ω та відрізняються одна від одної за фазою на $1/3$ періоду T

$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t ; \\ e_B &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) ; \\ e_C &= E_m \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) , \end{aligned}$	(7.1)
--	-------

або у комплексному вигляді

$\underline{E}_A = E_\phi e^{j0^\circ} ; \underline{E}_B = E_\phi e^{-j120^\circ} ; \underline{E}_C = E_\phi e^{+j120^\circ} ,$	(7.2)
---	-------

де $E_\phi = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$ - діюче значення фазної ЕРС генератора.

Фазні напруги на затискачах генератора подібно до ЕРС також утворюють симетричну систему

$\underline{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ} ; \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ} ; \underline{U}_C = U_\phi e^{+j120^\circ} ,$	(7.3)
---	-------

Лінійні напруги на затискачах генератора, при з'єднанні його обмоток "зіркою", у відповідності з другим законом Кірхгофа дорівнюють геометричній різниці відповідних фазних напруг

$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_{\phi} e^{j0^\circ} - U_{\phi} e^{-j120^\circ} = U_{\phi} e^{j30^\circ}; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C = U_{\phi} e^{-j120^\circ} - U_{\phi} e^{j120^\circ} = U_{\phi} e^{-j90^\circ}; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A = U_{\phi} e^{j120^\circ} - U_{\phi} e^{j0^\circ} = U_{\phi} e^{j150^\circ},\end{aligned}$	(7.4)
---	-------

де $U_{\phi} = \sqrt{3}U_{\phi}$ - лінійна напруга генератора.

Напруга між нейтральними точками навантаження та генератора називається напругою "зміщення нейтралі" $\underline{U}_N$.

Навантаження в трифазній системі може бути симетричним та несиметричним. Навантаження вважається симетричним, якщо комплексні опори окремих фаз приймачів дорівнюють один одному

$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Z_{\phi} e^{j\phi},$	(7.5)
---	-------

тобто опори фаз приймачів дорівнюють один одному як за значенням, так і за характером. Як правило, трифазний приймач є симетричним навантаженням, а сукупність однофазних – несиметричним. Несиметрія також виникає при обривах та коротких замиканнях у фазах симетричних приймачів.

Комплекс діючого значення напруги "зміщення нейтралі"

$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N},$	(7.6)
--	-------

де $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}$, $\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}$, $\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}$, - комплексні провідності фаз,

$\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$ - комплексна провідність нейтрального проводу ($\underline{Y}_N = \infty$,

якщо цей провід є у наявності й $\underline{Y}_N = 0$, якщо його немає).

За другим законом Кірхгофа комплекси фазних напруг на затискачах приймачів

$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N,$	(7.7)
--	-------

Якщо $\underline{U}_N \neq 0$ фазні напруги на затискачах приймачів відрізня-

ються одна від одної та від фазних напруг генератора, виникає так званий "перекіс фаз", що є недопустимим.

За законом Ома фазні (лінійні) струми

$\underline{I}_a = \underline{U}_a \underline{Y}_a; \quad \underline{I}_b = \underline{U}_b \underline{Y}_b; \quad \underline{I}_c = \underline{U}_c \underline{Y}_c,$	(7.8)
--	-------

Згідно з першим законом Кірхгофа:

при наявності нейтрального проводу

$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \underline{I}_N;$	(7.9)
--	-------

при його відсутності

$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$	(7.10)
---	--------

7.1.3 Симетричний режим

Якщо електричне коло складається із симетричного генератора та симетричного навантаження, то воно працює у симетричному режимі. У цьому випадку

$\underline{U}_N = \frac{(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) \underline{Y}_a}{3 \underline{Y}_a + \underline{Y}_N} = 0,$	(7.11)
--	--------

Тому напруги на фазах приймача дорівнюють відповідним напругам на генераторі (див. формули 7.7).

Фазні струми згідно із формулами (7.8) утворюють симетричну систему (тобто рівні за значеннями та зсунуті відносно один одного на кути $\pm \frac{2\pi}{3}$ та на однакові кути відносно відповідних фазних напруг

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_\phi).$$

Векторна діаграма для випадку симетричного режиму наведена на рисунку 7.2.

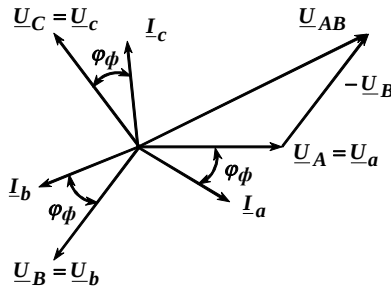


Рисунок 7.2 – Векторна діаграма у випадку симетричного режиму

Отже, геометрична сума фазних струмів та струм у нейтральному проводі

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \underline{I}_N = 0; \quad (7.12)$$

Тому для симетричних трифазних приймачів нейтральний провід не використовують.

Активна потужність у випадку симетричного режиму

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_\phi; \quad (7.13)$$

7.1.4 Несиметричний режим при наявності нейтрального проводу

У випадку несиметричного навантаження ($\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$). При наявності нейтрального проводу, опором якого можна зневажати ($\underline{Z}_N \approx 0$), потенціали нейтральних точок генератора та споживача однакові та напруга зсуву нейтралі $\underline{U}_N = 0$. При цьому як й у попередньому випадку напруги на фазах приймача дорівнюють відповідним напругам на генераторі (див. формули 7.7).

Несиметрія навантаження у цьому випадку обумовлює несиметричну систему фазних (лінійних) струмів та появу струму у нейтральному проводі $\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c \neq 0$.

Векторну діаграму для загального випадку несиметричного навантаження ($\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$) наведено на рисунку 7.3.

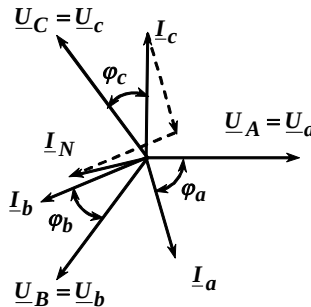


Рисунок 7.3 – Векторна діаграма у випадку несиметричного режиму при наявності нейтрального проводу

Обрив нейтрального проводу призведе до "перекосу" фаз, тому в нього запобіжники не встановлюють.

Активна потужність у випадку несиметричного режиму визначається як сума потужностей фаз

$$P = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c ; \quad (7.14)$$

Вона може бути виміряна за допомогою трьох однофазних ватметрів, що вмикнуті на відповідні фазні струми та напруги.

7.1.5 Несиметричний режим при відсутності нейтрального проводу

У випадку несиметричного режиму при відсутності нейтрального проводу напруга зсуву нейтралі $\underline{U}_N \neq 0$. Проаналізуємо наслідки цього факту за допомогою векторної діаграми. Положення вектора $\underline{U}_N$ на комплексній площині може бути визначено як за допомогою розрахунку по формулі (7.6) так і за даними вимірювань за допомогою циркуля. Побудову розпочинають з векторів фазних напруг на генераторі $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ (рис. 7.4).

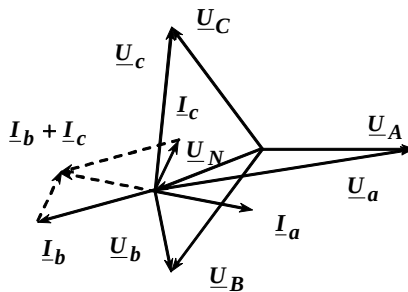


Рисунок 7.4 – Векторна діаграма у випадку несиметричного режиму при відсутності нейтрального проводу

Потім з кінців цих векторів як із центрів, проводять окружності радіусами, які в вибраному масштабі дорівнюють фазним напругам навантаження $\underline{U}_a$, $\underline{U}_b$, $\underline{U}_c$. Точка перетину цих трьох окружностей відповідає кінцю вектора $\underline{U}_N$. Фазні напруги навантаження дорівнюють геометричним різницям між векторами $\underline{U}_a$, $\underline{U}_b$, $\underline{U}_c$ та вектором $\underline{U}_N$. Цей метод має назву метод засічок.

Фазні напруги навантаження не тільки не утворюють симетричної системи, але й взаємно залежні. Перекіс фаз є основним недоліком з'єднання трипровідна "зірка". Тому воно не використовується при несиметричному навантаженні.

Вектори фазних струмів $\underline{I}_a$, $\underline{I}_b$, $\underline{I}_c$ будуються з кінця вектора $\underline{U}_N$, як із початку координат. Фазні струми не утворюють симетричної системи, але за першим законом Кірхгофа їхня геометрична сума повинна дорівнювати нулю.

Активна потужність у випадку також визначається як сума потужностей фаз (7.14). Вона може бути виміряна за допомогою трьох однофазних ватметрів, що вмикаються на відповідні фазні струми та напруги, або методом двох ватметрів.

7.2 Порядок проведення підготовчої роботи

7.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

7.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схема електричного кола (рис. 7.5), таблиці 7.2, 7.3 та векторна діаграма п. 7.2.3.

7.2.3 Побудувати якісну векторну діаграму для з'єднання "чотирьохпровідна зірки" у випадку несиметричного навантаження згідно таблиці 7.1. Вибір варіанту визначається останньою цифрою в академічному журналі групи. Значення активних та реактивних опорів вважати однаковими

Таблиця 7.1 – Характер несиметричного навантаження у фазах

	№ варіанту									
Фаза	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	X_C	X_L	R	X_C	R	X_L	X_C	X_C	R	X_L
В	X_L	X_C	X_L	R	R	R	R	R	X_C	R
С	R	R	R	X_L	X_C	X_L	R	X_C	R	R

7.3 Опис лабораторної установки

Моделювання виконується за допомогою комп'ютера. Лабораторна установка включає контрольно-вимірювальні прилади, трифазне електричне коло, що складається із трифазного генератора змінного струму й підключених до нього по чотирьохпроводній схемі приймачів, які з'єднані зіркою. Моделювання режимів роботи приймачів, режимів навантаження здійснюється за допомогою клавіатури комп'ютера й миші.

Живлення установки здійснюється від мережі змінного трифазного струму.

7.4 Порядок проведення роботи

7.4.1 Ознайомитися з електричною схемою, приладами й елементами (див. рис. 7.4). Вивчити принципову схему електричного кола. Одержати дозвіл викладача на виконання лабораторної роботи. Включити комп'ютер. Запустити програму Electronics Workbench.

7.4.2 Приступитися до безпосереднього комп'ютерного моделювання експериментів у наступному порядку:

- зібрати комп'ютерну модель схеми. Для цього, використовуючи панель груп бібліотеки компонентів і мишу, помістити на робоче поле програми Electronics Workbench моделі елементів схеми й вимірювальних приладів. Із цих елементів зібрати модель електричної схеми й підключених до неї вимірювальних приладів відповідно до рис. 7.5. З'єднання елементів виконується за допомогою миші;

- установити початкові параметри елементів схеми й джерел: $R = 100 \text{ Ом}$; ЕРС джерел: $E = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$. Установити початкові фази трьох джерел синусоїдальної напруги – $0, 120, 240$ градусів відповідно;

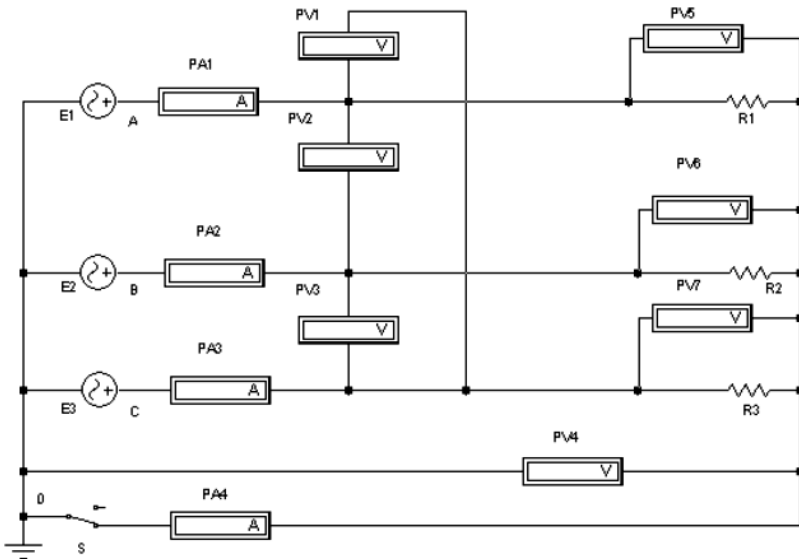


Рисунок 7.5 – Схема досліджуваного електричного кола при з'єднанні приймачів "зіркою"

- задати параметри вимірювальних приладів. Установити всі вимірювальні прилади в режим роботи АС (вимір змінної напруги або струму). Інші параметри за замовчуванням;

- пред'явити підготовлену модель схеми для перевірки викладачеві.

7.4.3 З дозволу викладача увімкнути схему й зробити виміри згідно табл. 7.2. Показання приладів занести в табл. 7.2, змінюючи величини опорів фаз.

Примітка. Діючі значення лінійних струмів, що дорівнюють фазним струмам, визначаються по амперметрах РА1, РА2, РА3, а струм в нульовому проводі - по амперметру РА4. Напруга U_0 вимірюється вольтметром PV4. Перемикач S керується клавішею ПРОБІЛ.

7.4.4 Послідовно встановити різні режими роботи приймачів, з'єднаних зіркою.

Режими роботи, що підлягають розгляду:

- рівномірне навантаження трьох фаз ($R_1 = R_2 = R_3$) без нульового проводу;

- те ж саме з нульовим проводом;

- нерівномірне навантаження фаз ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$) без нульового проводу;

- те ж з нульовим проводом;

- обрив однієї з фаз ($R_1 = R_2; R_3 = \infty$) без нульового проведення;

- те ж саме з нульовим проводом;

- коротке замикання однієї з фаз при рівномірному навантаженні двох інших фаз ($R_2 = R_3; R_1 = 0$) без нульового проводу (вимикач S розімкнута). Для проведення досвіду короткого замикання необхідно відключити схему, замкнути накоротко фазу А, розімкнути вимикач у нульовому проведенні, включити схему й зробити виміри.

Варто мати на увазі, що вольтметр PV0 буде давати покази, відмінні від нуля, тільки у випадку нерівномірного навантаження фаз і відключеному вимикачі S. Амперметр РА4 буде давати показання, відмінні від нуля, у випадку нерівномірного навантаження фаз і включеному вимикачі S.

7.4.5 Зупинити процес моделювання. Пред'явити дані дослідів для перевірки викладачеві й з його дозволу модель установки розібрати. Закрити створений файл без збереження його даних. Робоче місце привести у вихідний стан і пред'явити викладачеві.

Таблиця 7.3 – Результати дослідження трифазного кола при з'єднанні приймачів "зіркою"

Режим роботи	Тип з'єднання	Виміряно								Розраховано			
		U_a ,	U_b ,	U_c ,	I_a ,	I_b ,	I_c ,	U_N ,	I_N ,	P_a ,	P_b ,	P_c ,	P ,
		В	В	В	А	А	А	В	А	Вт	Вт	Вт	Вт
Рівномірне навантаження трьох фаз ($R_1 = R_2 = R_3$)	YN												
	Y												
Нерівномірне навантаження фаз ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$)	YN												
	Y												
Обрив однієї з фаз ($R_1 = R_2$; $R_3 = \infty$)	YN												
	Y												
Коротке замикання однієї з фаз при рівномірному навантаженні двох інших фаз ($R_2 = R_3$; $R_1 = 0$) без нульового проводу	Y												

7.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

7.5.1 Розрахувати активні потужності у кожній фазі навантаження для кожного режиму.

7.5.2 Використовуючи результати дослідів побудувати векторну діаграму для рівномірного навантаження.

7.5.3 Використовуючи результати дослідів побудувати векторні діаграми нерівномірного навантаження при наявності нейтрального проводу та його відсутності.

7.5.4 Використовуючи результати дослідів побудувати векторні діаграми для режиму обрив фазного проводу у фазі "с" при наявності нейтрального проводу та його відсутності.

7.5.5 Використовуючи результати дослідів побудувати векторні діаграми для режиму короткого замикання у фазі "а" при відсутності нейтрального проводу.

7.5.6 Обчислити для всіх режимів роботи потужність кожної фази навантаження та усього електричного кола.

7.5.7 Зробити висновки по роботі.

7.6 Контрольні запитання

7.6.1 Який режим називається симетричним.

7.6.2 Довести, що алгебраїчна сума лінійних напруг симетричного генератора дорівнює нулю.

7.6.3 Довести, що геометрична сума векторів лінійних струмів у симетричному режимі дорівнює нулю.

7.6.4 Запишіть у комплексній формі лінійні та фазні напруги генератора.

7.6.5 Чому дорівнює струм нейтрального проводу? У яких випадках він виникає?

7.6.6 Назвіть та покажіть на схемі електричного кола лінійні та фазні напруги генератора.

7.6.7 Назвіть переваги з'єднання чотирьохпроводна та трипровідна зірка.

7.6.8 Що називається напругою зміщення нейтралі? Як її вимірюють?

7.6.9 Коли на практиці застосовують з'єднання трипровідна зірка, а коли чотирьохпроводна зірка?

7.6.10 Як побудувати векторну діаграму для з'єднання трипровідна зірка методом засічок?

Лабораторна робота №8

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧІВ ЗА СХЕМОЮ "ТРИКУТНИК"

Мета роботи: дослідити трифазне коло при з'єднанні приймачів за схемою "трикутник", придбати навички аналізу трифазних кіл за допомогою векторних діаграм у різних режимах роботи електричного кола.

8.1 Короткі теоретичні відомості

8.1.1 Основні визначення

Обмотки генераторів, трансформаторів та приймачі в трифазних колах можуть з'єднатися за схемою "трикутник".

На рисунку 8.1 наведена схема трифазного кола для випадку з'єднання обмоток генератора та приймачів "трикутником".

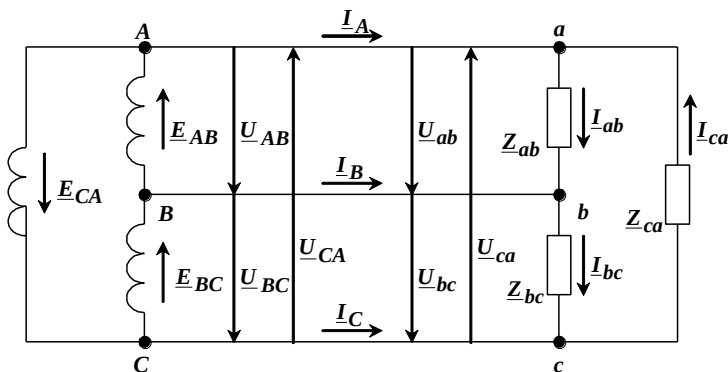


Рисунок 8.1 – Схема трифазного кола при з'єднанні обмоток генератора та приймачів "трикутником"

Затискачі генератора позначаються великими літерами **A, B, C**, а затискачі навантаження малими літерами **a, b, c**. У випадку коли опорами лінійних проводів можна зневажати ($\underline{Z}_l = 0$) лінійні напруги генератора та навантаження дорівнюють одна одній. У трикутнику приймачів відповідні лінійні та фазні напруги теж співпадають.

Коли генератор є симетричним, в кожній його фазі діють ЕРС, які дорівнюють одна одній по амплітуді та частоті і зсунуті за фазою

на кут 120° . Фазні та лінійні напруги генератора дорівнюють одна одній.

$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= U_{\text{л}} e^{j30^\circ}; \\ \underline{U}_{BC} &= U_{\text{л}} e^{-j90^\circ}; \\ \underline{U}_{CA} &= U_{\text{л}} e^{j150^\circ},\end{aligned}$	(8.1)
---	-------

де $U_{\text{л}} = U_{\phi}$ - лінійна (фазна) напруга генератора.

Комплекси фазних струмів визначаються за законом Ома:

$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}},$	(8.2)
---	-------

де $\underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ca}$ - комплекси фазних опорів навантаження.

Комплекси лінійних струмів визначаються за першим законом Кірхгофа:

$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$	(8.3)
--	-------

При з'єднанні "трикутником", так же як і у випадку з'єднання "зірка" може мати місце як симетричне, так несиметричне навантаження фаз.

8.1.2 Симетричне навантаження

Навантаження вважається симетричним, якщо комплексні опори окремих фаз приймачів дорівнюють один одному

$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = Z_{\phi} e^{j\varphi_{\phi}}.$	(8.4)
--	-------

У цьому випадку діючи значення фазних струмів однакові

$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ca} = I_{\phi}.$	(8.5)
--	-------

Векторна діаграма для випадку симетричного навантаження наведена на рисунку 8.2.

Як можна побачити з векторної діаграми лінійні струми утворюють симетричну систему.

З трикутників, які утворюють вектори фазних та лінійних струмів можна визначати

$I_{\text{л}} = 2I_{\phi} \cos 30^\circ = 2I_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}I_{\phi}.$	(8.6)
---	-------

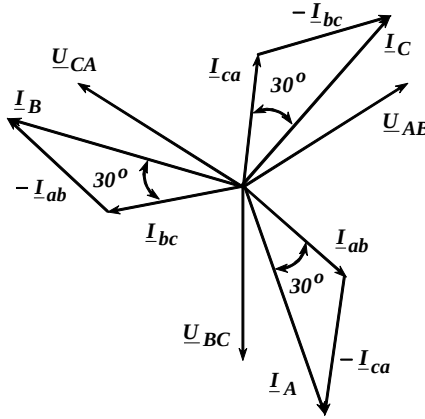


Рисунок 8.2 – Векторна діаграма при симетричному навантаженні

Активна потужність кола при симетричному навантаженні

$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_{\phi}.$	(8.7)
--	-------

8.1.3 Несиметричне навантаження

При несиметричному навантаженні у загальному випадку $\underline{Z}_{ab} \neq \underline{Z}_{bc} \neq \underline{Z}_{ca}$.

Фазні напруги приймачів (за винятком випадку обриву лінійного проводу) створюють симетричну систему, але як фазні, так і лінійні струми вже несиметричні. Фазні струми визначаються за виразами (8.2), а лінійні – за виразами (8.3). Якщо додати праві та ліві частини виразів (8.3), отримаємо

$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0.$	(8.8)
--	-------

Векторна діаграма для випадку несиметричного навантаження наведена на рисунку 8.3.

При несиметричному навантаженні співвідношення (8.6) та (8.7) не виконуються. Активна потужність у цьому випадку визначається як алгебраїчна сума потужностей окремих фаз

$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} =$ $= U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca}.$	(8.9)
---	-------

Вона може бути виміряна за допомогою трьох однофазних ватметрів, що вмикнуті на відповідні фазні струми та напруги, або мето-

дом двох ватметрів (ватметри вмикаються за схемою, що наведена на рис. 8.4).

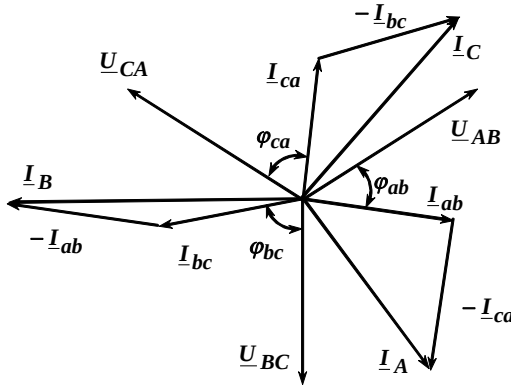


Рисунок 8.3 – Векторна діаграма при несиметричному навантаженні

8.1.3 Вимірювання активної та реактивної потужностей методом двох ватметрів

Доведемо, що за показами двох ватметрів, що з'єднані за такою схемою двох ватметрів, можна визначити активну потужність навантаження. Миттєве значення активної потужності, яке вимірюють обидва ватметри

$p = p_1 + p_2 = u_{AB}i_A + u_{CB}i_C.$	(8.10)
--	--------

Так як

$\begin{aligned} i_A &= i_{ab} - i_{ca}; \quad i_C = i_{ca} - i_{bc}, \\ u_{CB} &= -u_{BC} = -(u_{AB} + u_{CA}), \end{aligned}$	(8.11)
---	--------

то

$\begin{aligned} p &= u_{AB}(i_{ab} - i_{ca}) - (u_{AB} + u_{CA})(i_{ca} - i_{bc}) = \\ &= u_{AB}i_{ab} + u_{CB}i_{bc} + u_{CA}i_{ca}. \end{aligned}$	(8.12)
---	--------

Отже, сумарна активна потужність, яку вимірюють обидва ватметри, дорівнює активній потужності всього трифазного навантаження, незалежно від того, як навантажені фази.

Цей засіб виміру носить штучний характер, тому розподіл активної потужності між показами двох ватметрів залежить у більший мірі

не від розподілу навантаження, а від значення та знака кута φ навантаження.

У випадку симетричного навантаження на підставі векторної діаграми (див. рис. 8.2) отримаємо

$P_1 = U_{AB} I_A \cos(\underline{U}_{AB} \wedge \underline{I}_A) = U_L I_L \cos(30^\circ + \varphi);$ $P_2 = U_{CB} I_B \cos(\underline{U}_{CB} \wedge \underline{I}_B) = U_L I_L \cos(60^\circ - 30^\circ - \varphi) =$ $= U_L I_L \cos(30^\circ - \varphi).$	(8.13)
---	--------

З виразів (8.13) видно, що показання ватметрів будуть рівними при симетричному навантаженні резистивного характеру ($\varphi = 0$). При симетричному навантаженні індуктивного характеру по мірі збільшення кута φ показання другого ватметра будуть збільшуватися, а першого зменшуватися. При куті $\varphi = 60^\circ$ кут між $\underline{U}_{AB}$ та $\underline{I}_A$ дорівнює 90° , і показання першого ватметра $P_1 = 0$. Якщо кут φ перевершує 60° то показання першого ватметра стають від'ємними, його стрілка буде прагнути відхилятися від "0" вліво. Для отримання відліку потрібно перемикнути кінці обмотки напруги та показання першого ватметра враховувати зі знаком "-".

У випадку симетричного навантаження за допомогою двох ватметрів, що включені за схемою рис. 8.4, можна виміряти реактивну потужність навантаження. Реактивна потужність у випадку симетричного навантаження визначається за формулою

$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi.$	(8.14)
--	--------

Якщо знайти різницю показів ватметрів, то отримаємо

$P_1 - P_2 = U_L I_L \cos(30^\circ + \varphi) - U_L I_L \cos(30^\circ - \varphi) = ;$ $= U_L I_L (\cos(30^\circ + \varphi) - \cos(30^\circ - \varphi)) =$ $= U_L I_L 2 \sin 30^\circ \sin \varphi = U_L I_L \sin \varphi.$	(8.15)
--	--------

Отже, щоб отримати значення реактивної потужності, необхідно різницю показів ватметрів помножити на $\sqrt{3}$.

$Q = \sqrt{3} (P_1 - P_2).$	(8.16)
-----------------------------	--------

8.2 Порядок проведення підготовчої роботи

8.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

8.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схема електричного кола (рис. 8.4), таблиця 8.2 та векторна діаграма п.8.2.3.

8.2.3 Побудувати якісну векторну діаграму для з'єднання "трикутник" у випадку несиметричного навантаження згідно таблиці 8.1. Вибір варіанту визначається останньою цифрою в академічному журналі групи. Значення активних та реактивних опорів вважати однаковими

Таблиця 8.1 - Характер несиметричного навантаження у фазах

	№ варіанту									
Фаза	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>ab</i>	X_L	X_C	X_C	R	X_L	X_C	X_L	R	X_C	R
<i>bc</i>	R	R	R	X_C	R	X_L	X_C	X_L	R	R
<i>ca</i>	X_L	R	X_C	R	R	R	R	R	X_L	X_C

8.3 Опис лабораторної установки

Моделювання виконується за допомогою комп'ютера. Лабораторна установка включає контрольно-вимірювальні прилади, трифазне електричне коло, що складається із трифазного генератора змінного струму й підключених до нього приймачів, трикутником. Моделювання режимів роботи приймачів, режимів навантаження здійснюється за допомогою клавіатури комп'ютера й миші.

Живлення установки здійснюється від мережі змінного трифазного струму.

8.4 Порядок проведення роботи

8.4.1 Ознайомитися з електричною схемою, приладами й елементами (див. рис. 8.4). Вивчити принципову схему електричного кола. Одержати дозвіл викладача на виконання лабораторної роботи. Включити комп'ютер. Запустити програму Electronics Workbench.

8.4.2 Приступитися до безпосереднього комп'ютерного моделювання експериментів у наступному порядку:

- зібрати комп'ютерну модель схеми. Для цього, використовуючи панель груп бібліотеки компонентів і мишу, помістити на робоче

поле програми Electronics Workbench моделі елементів схеми й вимірювальних приладів. Із цих елементів зібрати модель електричної схеми й підключених до неї вимірювальних приладів відповідно до рис. 8.4. З'єднання елементів виконується за допомогою миші;

- установити початкові параметри елементів схеми й джерел: $R = 100 \text{ Ом}$; ЕРС джерел: $E = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$. Установити початкові фази трьох джерел синусоїдальної напруги – $0, 120, 240$ градусів відповідно;

- задати параметри вимірювальних приладів. Установити всі вимірювальні прилади в режим роботи АС (вимір змінної напруги або струму). Інші параметри за замовчуванням;

- пред'явити підготовлену модель схеми для перевірки викладачеві.

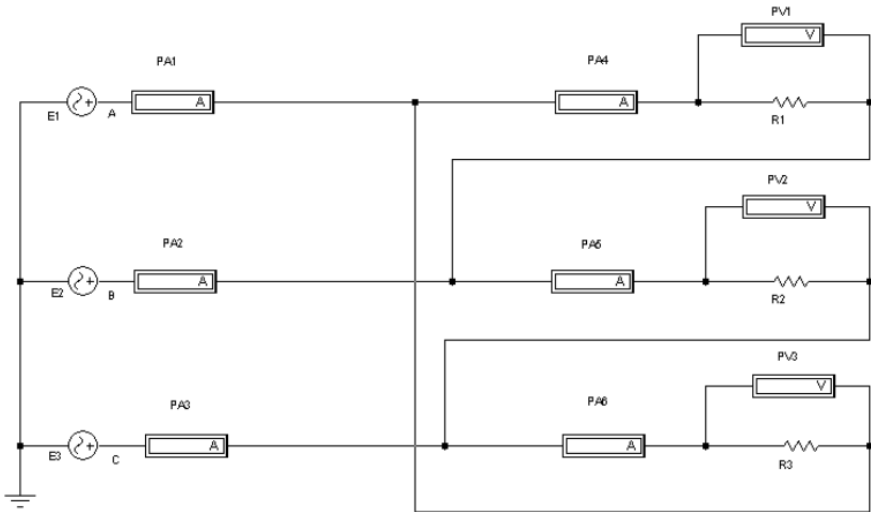


Рисунок 8.4 – Схема досліджуваного електричного кола при з'єднанні приймачів "трикутником"

8.4.3 З дозволу викладача увімкнути схему й зробити виміри згідно табл. 8.2. Показання приладів занести в табл. 8.2, змінюючи величини опорів фаз.

Примітка. У схемі амперметрами PA1, PA2, PA3 визначаються лінійні струми I_A, I_B, I_C , а амперметрами PA4, PA5, PA6 фазні струми I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} . Напруги вимірюються вольтметрами PV1-PV3;

Таблиця 8.2 – Результати дослідження трифазного кола при з'єднанні приймачів "трикутником"

Режим роботи	Виміряно										Розраховано		
	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_{ab},$ Вт	$P_{bc},$ Вт	$P_{ca},$ Вт	$P,$ Вт
Рівномірне навантаження фаз ($R_1 = R_2 = R_3$)													
Нерівномірне навантаження фаз ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$)													
Обрив однієї з фаз навантаження фаз ($R_1 \neq R_2;$ $R_3 = \infty$)													
Нерівномірне навантаження фаз ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$) з обривом лінійного проводу фази С													

8.4.4 Послідовно встановити різні режими роботи приймачів, з'єднаних трикутником, змінюючи величину опорів фаз.

Режими роботи, що підлягають розгляду:

- рівномірне навантаження фаз ($R_1 = R_2 = R_3$);
- нерівномірне навантаження фаз ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$);
- обрив однієї з фаз навантаження фаз ($R_1 \neq R_2$; $R_3 = \infty$);
- нерівномірне навантаження фаз ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$) з обривом лінійного проводу фази С.

Примітка. Обрив лінійного проводу здійснюється відключенням проводу від живлючої фази С.

При кожному новому стані навантаження вимірюють лінійні й фазні напруги й струми. Показання приладів записують у табл. 8.2.

8.4.5 Зупинити процес моделювання. Пред'явити дані дослідів для перевірки викладачеві й з його дозволу модель установки розібрати. Закрити створений файл без збереження його даних. Робоче місце привести у вихідний стан і пред'явити викладачеві.

8.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

8.5.1 Використовуючи результати дослідів побудувати векторну діаграму рівномірного навантаження фаз ($R_1 = R_2 = R_3$).

8.5.2 Використовуючи результати дослідів за побудувати векторну діаграму для нерівномірного навантаження фаз ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$).

8.5.3 Використовуючи результати дослідів побудувати векторну діаграму для режиму обриву однієї з фаз навантаження фаз ($R_1 \neq R_2$; $R_3 = \infty$).

8.5.4 Використовуючи результати дослідів побудувати векторну діаграму для режиму нерівномірного навантаження фаз ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$) з обривом лінійного проводу фази С.

8.5.5 Обчислити для всіх режимів роботи потужність кожної фази навантаження та усього електричного кола.

8.5.6 Зробити висновки по роботі.

8.6 Контрольні запитання

8.6.1. Як з'єднують приймачі за схемою "трикутник"?

8.6.2 Які переваги має схема з'єднання "трикутник", у яких випадках вона використовується?

8.6.3 Наведіть співвідношення між фазними та лінійними струмами у випадках симетричного та несиметричного навантаження при такому з'єднанні?

8.6.4 Як розраховують активні та реактивні потужності навантаження?

8.6.5 Як вимірюють активні потужності навантаження при симетричному та несиметричному навантаженні?

8.6.6 Як вимірюють реактивну потужність навантаження при симетричному режимі?

8.6.7 Як змінюються значення лінійних та фазних струмів у випадку обриву однієї з фаз навантаження, яке з'єднане за схемою "трикутник"?

8.6.8 Доказати, що за допомогою двох ватметрів можна виміряти активну потужність трифазного навантаження.

8.6.9 Чи залишається система струмів трифазною у випадку обриву фазного проводу? Лінійного проводу?

Лабораторна робота №9

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

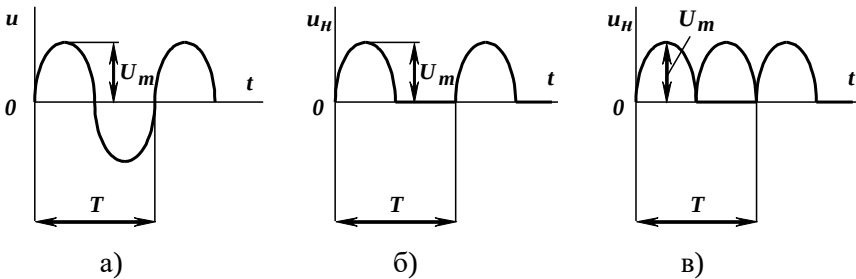
Мета роботи: дослідити електричне коло несинусоїдного струму, придбати навички аналізу електричних кіл несинусоїдного струму за допомогою розкладу періодичних функцій у ряд Фур'є, придбати навички виміру електричних величин у електричних колах несинусоїдного струму

9.1 Короткі теоретичні відомості

9.1.1 Основні визначення

Як правило, навіть у колах синусоїдного струму напруга та струм, зберігаючи періодичність, з різноманітних причин не є абсолютно синусоїдними. Це характерно для кіл електрозв'язку, електронних та напівпровідникових приладів, де це пов'язано з їхньою роботою.

Наприклад у однофазному колі, яке містить випрямляч, напруга u на вході випрямляча синусоїдна (рис. 9.1,а), а на його виході та на навантаженні напруга u_H вже несинусоїдна, що показано на рис. 9.1,б – для випадку однонапівперіодного випрямлення та 9.1,в – для випадку двонапівперіодного випрямлення.



9.1 – Напруга на вході (а) та виході випрямляча
(б – однонапівперіодного, в – двонапівперіодного)

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

Як відомо з курсу математики, будь яку періодичну функцію, що задовольняє умовам Дирихле можна розкласти в тригонометричний ряд. Наприклад, ряд для напруги

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos k\omega t = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_{uk}). \end{aligned} \quad (9.1)$$

де U_0 – постійна складова несинусоїдної напруги; k – номер гармоніки; B_k , C_k – коефіцієнти гармонійного ряду k -ої гармоніки; ω – кутова частота несучої (першої) гармоніки; U_{mk} , ψ_{uk} – амплітуда та початкова фаза k -ої гармоніки.

Постійна складова дорівнює середньому значенню напруги за період повторення T

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (9.2)$$

Коефіцієнти гармонійного ряду B_k , C_k визначаються за формулами

$$\begin{aligned} B_k &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin k\omega t dt; \\ C_k &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos k\omega t dt. \end{aligned} \quad (9.3)$$

Знаючи коефіцієнти гармонійного ряду, легко перейти визначити амплітуду та початкову фаза k -ої гармоніки

$$\begin{aligned} U_{mk} &= \sqrt{B_k^2 + C_k^2}; \\ \psi_{uk} &= \arctg \frac{C_k}{B_k}. \end{aligned} \quad (9.4)$$

Для типових функцій у довідниках наведені готові розкладення в тригонометричні ряди Фур'є.

Для розрахунку лінійних електричних кіл з несинусоїдними джерелами живлення застосовують метод накладення. Струми та на-

пруги розраховують незалежно для постійної та кожної гармонічної складових. Миттєве значення струму в колі дорівнює сумі миттєвих значень складових струмів. Таким чином, розрахунок лінійного кола з несинусоїдними ЕРС ведеться за правилами розрахунку кіл постійного струму для постійних складових, для гармонійних складових – за правилами розрахунку кіл синусоїдного струму. 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

$$\begin{aligned} X_{Lk} &= k\omega L = kX_{L1}; \\ X_{Ck} &= \frac{1}{k\omega C} = \frac{X_{C1}}{k}. \end{aligned} \quad (9.5)$$

Прилади магнітоелектричної системи вмикають у коло несинусоїдного струму вимірюють постійні складові струму та напруги, а електромагнітної системи діючи значення струму та напруги. Діюче значення змінної складової напруги можна виміряти за допомогою вольтметра електромагнітної системи, що з'єднаний послідовно з конденсатором. Так як постійний струм через конденсатор не проходить, то по вимірювальній обмотці вольтметра буде протікати тільки синусоїдні складові струму. Вольтметр буде вимірювати тільки змінну складову напруги. При цьому ємність конденсатору необхідно вибирати таким чином, щоб похибка вимірювання не перевершувала 5%. Це можливо в тому випадку, якщо вимірювана напруга на навантаженні U_k не буде перевершувати напругу на вольтметрі більш ніж на 5%. Ємність конденсатора визначається з цієї умови.

9.1.2 Однонапівперіодне випрямлення

У випадку однонапівперіодного випрямлення аналітичний запис напруги на навантаженні (рис. 9.1,б) має вигляд

$$u_H = \begin{cases} U_m \sin \omega t; & 0 \leq \omega t < \pi \\ 0 & \pi \leq \omega t < 2\pi \end{cases}. \quad (9.6)$$

або її можна подати у вигляді гармонійного ряду

$$u_H = \frac{2U_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \sin \omega t - \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t - \dots \right). \quad (9.7)$$

Постійна складова несинусоїдної (пульсуючої) напруги

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_H dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi}. \quad (9.8)$$

Діюче значення несинусоїдної (пульсуючої) напруги

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_H^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{U_m}{2}. \quad (9.9)$$

Діюче значення змінної складової несинусоїдної напруги

$$U_k = \sqrt{U^2 - U_0^2} = U_m \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2}} \approx 0.386 U_m. \quad (9.10)$$

Якщо навантаження активне, то крива струму повторює криву напруги на навантаженні, тому розрахунок струмів у колі аналогічне розрахунку напруги.

9.1.3 Двонапівперіодне випрямлення

У випадку двонапівперіодного випрямлення аналітичний запис напруги на навантаженні (рис. 9.1,в) має вигляд

$$u_H = |U_m \sin \omega t| = \begin{cases} U_m \sin \omega t; & 0 \leq \omega t < \pi \\ -U_m \sin \omega t; & \pi \leq \omega t < 2\pi \end{cases}. \quad (9.11)$$

або її можна подати у вигляді гармонійного ряду

$$u_H = \frac{4U_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t - \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \dots \right). \quad (9.12)$$

Постійна складова несинусоїдної (пульсуючої) напруги

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_H dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = \frac{2U_m}{\pi}. \quad (9.13)$$

Діюче значення несинусоїдної (пульсуючої) напруги

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_H^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (9.14)$$

Діюче значення змінної складової несинусоїдної напруги

$$U_k = \sqrt{U^2 - U_0^2} = U_m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2}} \approx 0.308 U_m. \quad (9.15)$$

9.1.3 Потужність у колі несинусоїдного струму

Активна потужність періодичного струму визначається як середня потужність за період

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (9.16)$$

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

$$P = P_0 + \sum_{k=1}^{\infty} P_k = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k, \quad (9.17)$$

де P_0 – активна потужність постійної складової, $\sum_{k=1}^{\infty} P_k$ – сума активних потужностей окремих гармонік.

Реактивна потужність у колі несинусоїдного струму

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k, \quad (9.18)$$

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

Повна потужність у колі несинусоїдного струму

$$S = UI, \quad (9.19)$$

де U , I – діючі значення несинусоїдних напруги та струму.

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

$$S^2 \geq P^2 + Q^2, \quad (9.20)$$

що обумовлено відмінністю у кривих струму та напруги.

Величина

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}, \quad (9.21)$$

називається потужністю спотворення, так як вона обумовлена тільки несинусоїдністю струмів та напруг.

9.2 Порядок проведення підготовчої роботи

9.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

9.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схеми електричних кіл (рис. 9.3, 9.4), таблиці 9.2 та 9.3 та розрахунок за п. 9.2.3.

9.2.3 Визначити покази вольметрів магнітоелектричної системи V1 та електромагнітної системи V2, V3, V4 (рис. 9.2), коли відомі покази одного з них (табл. 9.1). Напруга на вході електричного кола синусоїдна. Номер бригади задається викладачем.

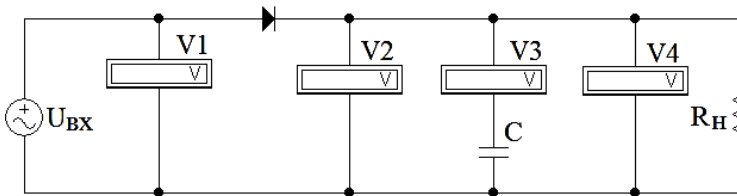


Рисунок 9.2 – Розрахункова схема

Таблиця 9.1 – Задані покази вольметрів

Покази приладів	Номер бригади					
	1	2	3	4	5	6
V1	100					80
V2		90				
V3			80		100	
V4				70		

9.3 Опис лабораторної установки

Моделювання виконується за допомогою комп'ютера. Лабораторна установка включає:

- однофазне джерело синусоїдної напруги;
- постійні резистори $R_{н1}$, $R_{н2}$;
- вольметри V1, V2, V3, V4;
- амперметри I1, I2;
- конденсатор C;
- однонапівперіодний випрямляч VD1;
- двонапівперіодний випрямляч.

9.4 Порядок проведення роботи

9.4.1 Скласти електричне коло за схемою рис.9.3 у пакеті програм "Electronics Workbench". Запросити викладача для перевірки правильності складання електричного кола.

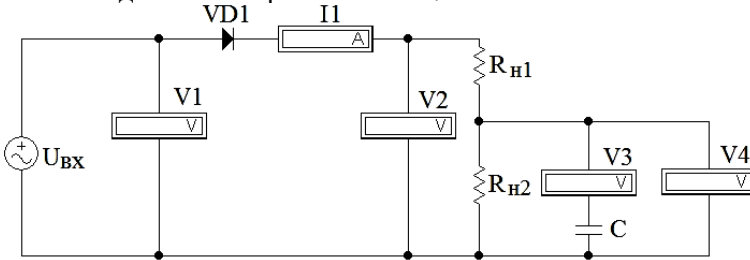


Рисунок 9.3 – Досліджувана схема однонапівперіодного випрямлення

9.4.2 Результати вимірювань показати викладачеві й записати в табл.9.2.

9.4.3 Скласти електричне коло за схемою рис. 9.4. Запросити викладача для перевірки правильності складання електричного кола.

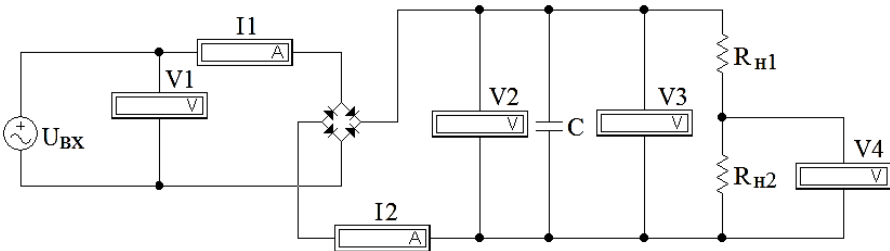


Рисунок 9.4 – Досліджувана схема двонапівперіодного випрямлення

Таблиця 9.2 - Результати дослідження кола несинусоїдного струму

Випрямлення	I_1 , А	I_2 , А	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В	U_4 , В
однапівперіодне		–				
двонапівперіодне						

9.4.4 Результати вимірювань показати викладачеві й записати в табл.9.2.

9.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

9.5.1 Для схеми на рис.9.3 побудувати графіки наступних функцій від часу: $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$, $U_4(t)$ та $I_1(t)$ у стовпчик один під одним. Визначити якість випрямленої напруги та амплітуду пульсацій випрямленої напруги.

9.5.2 Для схеми на рис.9.4 побудувати графіки наступних функцій від часу: $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$, $U_4(t)$ та $I_1(t)$, $I_2(t)$ у стовпчик один під одним. Визначити якість випрямленої напруги та амплітуду пульсацій випрямленої напруги.

9.5.3 Зробити висновки по роботі.

9.6 Контрольні запитання

9.6.1 Схема та принцип роботи однофазної однонапівперіодної схеми випрямлення напруги?

9.6.2 Схема та принцип роботи однофазної двонапівперіодної схеми випрямлення напруги?

9.6.3 Як зменшити амплітуду пульсацій випрямленої напруги?

9.6.4 Як зменшити амплітуду пульсацій випрямленого струму?

9.6.5 Як виміряти діюче значення змінної складової напруги?

9.6.6 Як розрахувати значення повної, активної та реактивної потужностей у колі несинусоїдного струму? Яким чином вони пов'язані зі значенням потужності спотворення?

Лабораторна робота №10

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З КОТУШКОЮ ІНДУКТИВНОСТІ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ EWB

Мета роботи: оволодіння навичками розрахунку та дослідження електричних кіл постійного струму з котушкою індуктивності у перехідному режимі роботи.

10.1 Короткі теоретичні відомості

10.1.1 Основні визначення

У випадку різних комутацій, тобто миттєвої зміни параметрів або схеми електричного кола (наприклад, вмикання чи вимикання всього кола, або окремих його частин) відбувається перехід від одного усталеного режиму в іншій усталений режим. При цьому виникають змінні струми та напруги, які супроводжуються електромагнітними явищами, що поєднуються терміном "перехідний процес". Перехідні процеси можуть виникати тільки у колах з індуктивними та (або) ємнісними елементами, які можуть накопичувати енергію у вигляді енергії магнітного або електричного поля.

З урахуванням того, що накопичена енергія не може змінитися миттєво, ємнісні та індуктивні елементи мають електромагнітну інерційність, яка враховується за допомогою двох законів комутації.

Перший закон комутації. В індуктивному елементі струм (та магнітний потік) не може змінитися стрибком, тобто безпосередньо після комутації зберігає значення, яке він мав безпосередньо до комутації

$$\begin{aligned} i_{L(0+)} &= i_{L(0-)}, \\ \Phi_{L(0+)} &= \Phi_{L(0-)}, \end{aligned} \tag{10.1}$$

Другий закон комутації. На ємнісному елементі напруга (та заряд) не може змінитися стрибком, тобто безпосередньо після комутації зберігає значення, яке вона мала безпосередньо до комутації

$$\begin{aligned} u_c(0+) &= u_c = u_c(0-) , \\ q(0+) &= q_c = q_c(0-). \end{aligned} \tag{10.2}$$

Перехідні струми та напруги визначають шляхом розв'язання систем інтегрально - диференціальних рівнянь, що складені за допомо-

гою методу безпосереднього застосування законів Кірхгофа або методу контурних струмів.

10.1.2 Вмикання індуктивної котушки до джерела постійної ЕРС

Розглянемо електричне коло з резистором та котушкою індуктивності схема якого наведена на рис. 10.1.

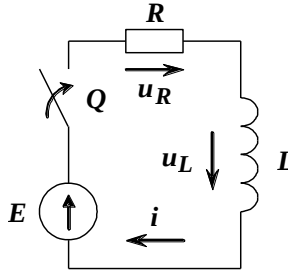


Рисунок 10.1 – Схема електричного кола з резистором та котушкою індуктивності

До комутації струм в електричному колі (а отже й у котушці індуктивності) був відсутній тому, що ключ Q був розімкнутий. Початкова умова роботи електричного кола: $i(0-) = 0$.

В результаті комутації ключ Q замкнувся й утворився контур. Складемо для нього рівняння за другим законом Кірхгофа

$$u_R + u_L = E, \quad (10.3)$$

або виразивши напруги через струм i

$$Ri + L \frac{di}{dt} = E. \quad (10.4)$$

Розв'язання цього рівняння шукаємо у вигляді суми двох складових: усталеної та вільної.

$$i = i_y + i_g. \quad (10.5)$$

Для усталеного струму маємо неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку

$$Ri_y + L \frac{di_y}{dt} = E. \quad (10.6)$$

ЕРС постійна, тому усталений струм буде також постійний. Тоді

$$\frac{di_y}{dt} = 0. \quad (10.7)$$

Отже, індуктивний елемент не впливає на значення усталеного постійного струму

$$i_y = I = \frac{E}{R}. \quad (10.8)$$

Для вільної складової струму маємо однорідне диференціальне рівняння першого порядку

$$Ri_g + L \frac{di_g}{dt} = 0. \quad (10.9)$$

Перейдемо від диференціального рівняння до алгебраїчного

$$R + Lp = 0. \quad (10.10)$$

Отримане алгебраїчне рівняння називається *характеристичним*, тому що його корні визначають вигляд вільної складової.

Розв'язання характеристичного рівняння:

$$p = -\frac{R}{L}. \quad (10.11)$$

Отже, вільна складова струму має вигляд

$$i_g = A \cdot e^{pt} = A \cdot e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (10.12)$$

де: A – постійна інтегрування;

e – основа натурального логарифма;

p – корінь характеристичного рівняння.

Об'єднаємо сталу й вільну складові разом

$$i = \frac{E}{R} + Ae^{pt}. \quad (10.13)$$

До комутації (при $t = 0 -$) струм був відсутній. За першим законом комутації безпосередньо після замикання ключа в вітці з індуктивним елементом струм зберігає значення

$$i(0+) = i(0-) = 0. \quad (10.14)$$

Отже, при $t = (0+)$ маємо:

$$0 = \frac{E}{R} + A. \quad (10.15)$$

Звідси

$$A = -\frac{E}{R}. \quad (10.16)$$

Отже

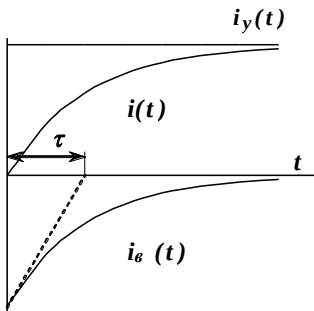
$$i = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{pt} = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (10.17)$$

ЕРС самоіндукції

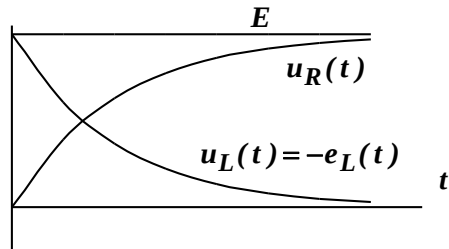
$$e = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d}{dt} \left(\frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \right) = -E e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (10.18)$$

У початковий момент ($t = 0+$) ЕРС самоіндукції повністю компенсує ЕРС джерела, тому струм $i(0+) = 0$ й $u_R(0+) = R \cdot i(0+) = 0$

З перебігом часу ЕРС самоіндукції убуває, а спад напруги на резистивному елементі (і струм у електричному колі) зростає за аперіодичним законом, асимптотично наближаючись до усталеного значення (рис. 10.2, а, б).



а) струм у колі



б) напруга на резистивному та індуктивному елементах

Рисунок 10.2 – Графіки зміни миттєвих значень струму та напруги у колі з резистивним й індуктивним елементами

Величина $\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{L}{R}$ має розмірність часу й має назву постійної часу. Її фізичний зміст – час протягом якого вільна складова зменшується в $e \approx 2,718$ разів у порівнянні зі своїм початковим значенням $i_g(0+)$

$$i_g(\tau) = i_g(0) \cdot e^{-1} = \frac{i_g(0)}{e} = \frac{A}{e}. \quad (10.19)$$

Ця величина може бути визначена графічно. Для цього необхідно провести дотичну до кривої $i_g(t)$ в точці, що відповідає довільному моменту часу $t = t_1$ й продовжити її до перетинання з віссю часу в точці $t = t_2$. Тоді постійна часу $\tau = t_2 - t_1$. Звичайно як довільний момент часу вибирають момент часу $t = 0$.

Величина, що зворотна постійній часу, називається *коефіцієнтом загасання*

$$\alpha = \frac{1}{\tau}. \quad (10.20)$$

Вільна складова струму загасає повільніше й, отже, новий сталий режим не встановлюється тим довше, чим більше постійна часу або чим менше коефіцієнт загасання.

Розглянемо як змінюється значення струму в колі для різних моментів часу виражене у відсотках від усталеного значення. Результати розрахунків наведені в табл. 10.1.

Таблиця 10.1 - Відносне значення струму в електричному колі (Рис.10.1) для різних моментів часу

t	c	τ	2τ	3τ	4τ	5τ	∞
$\frac{i}{i_y} 100$	%	63,2	86,5	95,0	98,2	99,3	100

Як видно з рис. 10.2,а та табл. 10.1, незважаючи на те, що перехідний процес триває нескінченно довго, вільна складова струму досить швидко згасає. Тому на практиці прийнято вважати, що через $t = (3...5)\tau$ перехідний процес закінчується.

10.1.3 Дослідження перехідних процесів за допомогою EWB.

В *Electronics Workbench* можна досліджувати перехідні процеси при впливі на схеми вхідних сигналів різної форми. Широкий набір приладів дозволяє робити вимірювання різних величин, задавати і змінювати вхідні параметри, будувати графіки. Усі прилади зображуються у вигляді, максимально наближеному до реального, тому працювати з ними просто й зручно. Результати моделювання можна вивести на принтер або імпортувати в текстовий або графічний редактор для їхньої подальшої обробки.

В наданій лабораторній роботі перехідний процес в котушці індуктивності моделюється шляхом підключення її до *генератора тактових імпульсів (Clock)*, який обираємо в Полі компонентів із Бібліотеки джерел живлення (Sources).



Перехідний процес в електричному колі з котушкою індуктивності виникає завдяки чергуванням включення й відключення вхідної напруги, що становить миттєву зміну параметрів кола.

Генератор виробляє послідовність прямокутних імпульсів. Можна регулювати амплітуду імпульсів, коефіцієнт заповнення (шпаруватість) і частоту проходження імпульсів. Відлік амплітуди імпульсів генератора йде від кінця, протилежного кінцю "+".

Осцилограф,  в програмі *Workbench*, являє собою аналог двопроменевого запам'ятовувального осцилографа й має дві модифікації: *просту* й *розширену*. Розширена модифікація по своїх можливостях наближається до кращих цифрових запам'ятовувальних осцилографів. Через те, що розширена модель займає багато місця на робочому полі, рекомендується починати дослідження з простою моделлю, а для докладного дослідження процесів – використовувати розширену модель. Осцилограф розташовано в Бібліотеці Інструментів (*Instruments*) – крайня праворуч із Поля компонентів.

Осцилограф можна підключити до вже включеної схеми або під час роботи схеми переставити виводи до інших точок – зображення на екрані осцилографа зміниться автоматично.

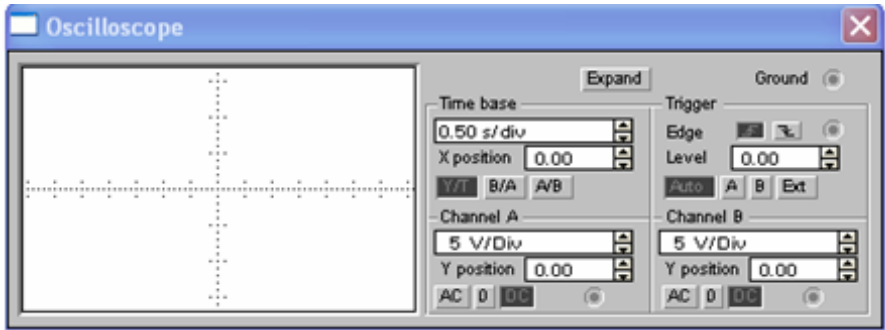


Рисунок 10.3 - Осцилограф, проста модифікація

Подвійним клацанням миші по зменшеному зображенні відкривається зображення передньої панелі *простої моделі* осцилографа із кнопками керування, інформаційними полями й екраном (рис. 10.3).

Для проведення вимірювань осцилограф потрібно налаштувати:

- 1) розташування осей, по яких відкладається сигнал (Y/T);
- 2) масштаб розгорнення по осях (Time base; Channel A; Channel B);
- 3) зсув початку координат по осях (X position; Y position);
- 4) режим роботи із входу: закритий або відкритий;
- 5) режим синхронізації: внутрішній або зовнішній.

Налаштування осцилографа проводиться за допомогою полів керування, розташованих на панелі керування.

Панель керування має загальний для обох модифікацій осцилографа вигляд і розділена на чотири поля керування:

- 1) горизонтальною розгорткою (*Time base*);
- 2) синхронізацією (*Trigger*);
- 3) каналом *A*;
- 4) каналом *B*.

Поле керування горизонтальною розгорткою (масштабом часу) служить для завдання масштабу горизонтальної осі осцилографа при спостереженні напруги на входах каналів *A* і *B* залежно від часу. Часовий масштаб задається в: (s/div, ms/div, μ s/div, ns/div відповідно). Величина однієї поділки може бути встановлена від 0,1 нс до 1 с. Масштаб може дискретно змінюватися на один крок при клацанні мишею по кнопках, праворуч від поля (кнопки: $\blacklozenge$).

За допомогою кнопок, розташованих у полі рядка *X POS*, можна дискретно зсувати початок осцилограми по горизонтальній осі. В

цьому ж полі розташовано три кнопки: Y/T , A/B , B/A , що дозволяють задавати вигляд залежності відображуваних сигналів:

- при натисканні на кнопку Y/T по вертикальній осі відкладається напруга, по горизонтальній осі – час;
- при натисканні на кнопки A/Y по вертикальній осі відкладається амплітуда напруги на вході каналу A , по горизонтальній осі – амплітуда напруги каналу B ;
- при натисканні на кнопку B/A навпаки. При цьому масштаб осей визначається установками відповідних каналів.

У режимах A/Y и B/A можна спостерігати частотні й фазові зрушення (фігури Ліссажу), петлі гістерезису, вольт-амперні характеристики і т. д.

Дві нижні частини панелі осцилографа є полями керування відображенням сигналів, поданих на входи каналів A і B відповідно. Верхнє вікно в поле дозволяє управляти масштабом осі відображуваної напруги по вертикальній або горизонтальній осі. Ціна поділок може дискретно встановлюватися від 10 mv/div до 5 kv/div. Масштаб для кожної осі встановлюється окремо. Щоб одержати зручне для роботи зображення на екрані осцилографа перед початком експерименту, слід установити масштаб, відповідний до очікуваної напруги.

Нижче розташоване поле, яке дозволяє дискретно посувати вісь X вгору або вниз. Для того, щоб розвести зображення від каналів A и B , слід скористатися зсувом по осі Y ($Y POS$) для одного або двох каналів.

Три нижні кнопки реалізують різні режими роботи входу осцилографа по входам. Режим роботи осцилографа із закритим входом установлюється натисканням на кнопку AC . У цьому режимі на вхід не пропускається постійна складова сигналу. При натисканні на кнопку DC осцилограф переходить у режим з відкритим входом. У цьому режимі на вхід осцилографа пропускається як постійна, так і змінна складова сигналу. При натисканні на кнопку 0 вхід осцилографа з'єднується із загальним виводом осцилографа, що дозволяє визначити положення нульової оцінки по осі Y .

Верхнє праве поле керування $TRIGGER$ визначає момент початку відображення осцилограми на екрані осцилографа. Кнопки в рядку $EDGE$ задають момент запуску осцилограми по фронту або по зрізу імпульсу на вході синхронізації. Поле $LEVEL$ дозволяє задавати рі-

вень, при перевищенні якого відбувається запуск осцилограми. Значення рівня можна зсунути на три поділки вниз або нагору.

Осцилограф має чотири режими синхронізації.

- Автоматичний режим (*AUTO*) – запуск осцилограми проводиться автоматично при підключенні осцилографа до схеми або при її включенні. Коли «промінь» доходить до кінця екрана, осцилограма знову прописується з початку екрана (новий екран);

- Режим запуску по входу *A* або *B*, у яких сигналом, що запускає, є сигнал, що надходить на відповідний вхід;

- Режим «Зовнішній запуск» (*EXT – external*). У цьому випадку сигналом запуску є сигнал, що подавався на вхід синхронізації.

Натискання клавіші *Expand* на панелі простої моделі відкриває вікно розширеної моделі осцилографа.

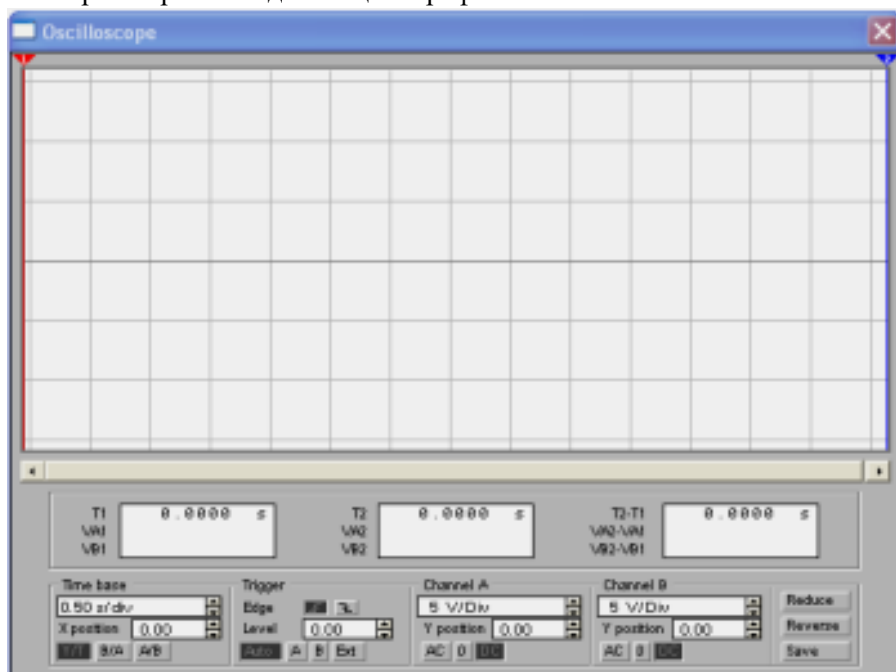


Рисунок 10.4 – Вікно розширеної моделі осцилографа

Панель розширеної моделі осцилографа на відміну від простої моделі розташована під екраном і доповнена трьома інформаційними табло, на які виводяться результати вимірювань. Крім того, безпосередньо під екраном перебуває лінійка прокручування, що дозволяє спостерігати будь-який часовий відрізок процесу від моменту включення до моменту вимикання схеми. По суті, розширена модель осцилографа – це зовсім інший прилад, що дозволяє набагато зручніше й більш точно проводити чисельний аналіз процесів.

На екрані осцилографа розташовано два курсори, позначені **1** і **2**, за допомогою яких можна виміряти миттєві значення напруги у будь-якій точці осцилограми. Для цього слід просто перетягнути мишею курсори за трикутники в їхній верхній частині в необхідне положення. Координати точок перетинання першого курсору з осцилограмами відображаються на лівому табло, координати другого курсору – на середньому табло. На правому табло відображаються значення різниць між відповідними координатами другого й першого курсорів. Результати вимірювань, отримані за допомогою розширеної моделі осцилографа, можна записати у файл. Для цього слід натиснути кнопку *Save* (Зберегти) і в діалоговому вікні ввести ім'я файлу.

Щоб повернутися до зображення простої моделі осцилографа, слід натиснути клавішу *Reduce*, розташовану в правому нижньому куті.

10.2 Порядок проведення підготовчої роботи

10.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

10.2.2 Детально ознайомитися з основами роботи електронної моделі осцилографа в *Electronics Workbench*.

10.2.3 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схема електричного кола (рис. 10.5), таблиці 10.2 та 10.3, розрахунок завдання за п. 10.2.4.

10.2.4 Розрахувати перехідний струм та напругу на індуктивному елементі у електричному колі (рис. 10.1), якщо задано: $E = 10 \text{ Ом}$, $R = 100 + 10n$, $L = 0.01n \text{ Гн}$,

де n - номер варіанту згідно з журналом групи.

Побудувати графіки залежностей $i = f(t)$, $u_L = f(t)$.

10.3 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи в середовищі EWB використовуються:

- генератор прямокутних імпульсів (Clock);
- ключі, що керовані клавішею [Space]  ;
- резистори R_{k1} , R_{14} і шунт $R_{ш}$;
- котушка індуктивності L ; - заземлювачі (Ground);
- амперметр (за бажанням);
- осцилограф.

10.4 Порядок проведення роботи

10.4.1 Включити в роботу програму Electronics Workbench звичайним шляхом.

10.4.2 В робочому полі EWB зібрати схему дослідження котушки індуктивності під час перехідного процесу (на зразок рисунку 10.5).

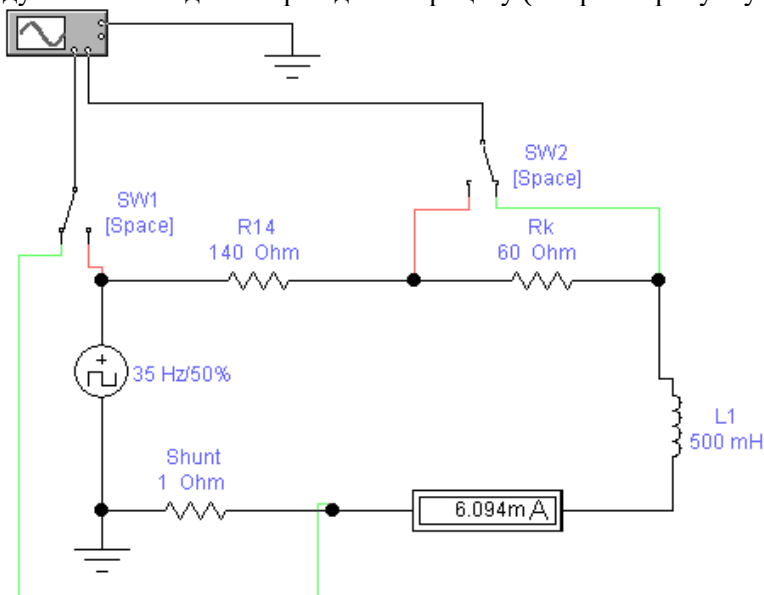


Рисунок 10.5 – Приклад схеми, призначеної для дослідження перехідного процесу в електричному колі з резистором та котушкою індуктивності

Встановити вихідні параметри кожного елемента схеми шляхом подвійного кліка маніпулятором на обраних елементах (закладка Label; Properties, інші – залишаємо за замовчуванням):

- Генератор прямокутних імпульсів (від 30 до 600 Гц. Заповнення 50%. Амплітуду напруги – від 3 до 600 Вольт);
- Резистори R_k (від 50 до 200 Ом), R_{14} – приблизно вдвічі більший ніж R_k , Шунт ($R_{ш} = 1$ Ом);
- Індуктивна котушка (від 300 мГн);
- Амперметр (змінити Value Mode: AC);
- Осцилограф – на осі X (розгортка часу) – від 1 мс/поділку; на осі Y (розгортка амплітуди) – відповідно до напруги генератора від 2 до 200 В/поділку. Застосувати виміри із “Відкритим входом” (DC). Вхід A осцилографа підключити на вихід генератора прямокутних імпульсів і на вхід шунта.

В подальшому всі параметри треба корегувати для отримання найкращих результатів.

10.4.3 Увімкнути схему в роботу, натиснувши клавішу активації справа зверху на панелі інтерфейсу (Activate simulation ).

10.4.4 На екрані осцилографа з'явиться рухомий імпульс, який потрібно зупинити. Для цього відкриваємо у верхньому меню Analysis Options (або просто: $Ctrl+Y$) і в закладці Instruments розділу «Oscilloscope» поставимо мітки в віконцях «Pause after each screen» і «Generate time steps automatically» і натиснемо ОК. Після цього на екрані з'явиться стабілізоване зображення імпульсів. Наступне (в часі) зображення за потреби можна відкрити клавішею F9 (на клавіатурі).

10.4.5 Замалювати у масштабі з екрана осцилографа графік зміни напруги на затискачах III $u(t)$ (Вхід A) і напругу на котушці індуктивності $u_k(t)$ (Вхід B). З цих графіків визначити амплітуди вхідної напруги U_m і напруги на котушці $U_{k\ m}$. Результати вимірів у 9 точках напруги u_k (за допомогою курсорів  або  на екрані осцилографа) занести до таблиці 10.2.

10.4.6 Зупинити роботу схему активатором О/І.

10.4.7 Натиснути правою кнопкою миші на один з ключів SW у робочій схемі і клавішею «Пробіл» (Space) переключити ключі в інше положення. Включити схему в роботу активатором О/І.

При цьому Вхід A осцилографа вимірює напругу на шунті (фактично – це струм в схемі, тільки в мА). Увага! можливо потрібно буде

зменшити масштаб каналу A (до ... mV/Div), щоб на екрані осцилографа з'явилася придатна до вимірів картинка.

Вхід B – вимірює напругу власне на індуктивності L .

Результати вимірів струму і напруги на індуктивності L занести до таблиці 10.2.

10.4.8 Зупинити роботу схему активатором О/І.

10.4.9 Змінити індуктивність L котушки в електричному колі на вдвічі більше (або менше) від початкової (подвійний клік на котушці, закладка *Value*). Повторити виміри і розрахунки параметрів.

Таблиця 10.2 – Результати дослідження перехідного процесу

t, c	0		τ		2τ		3τ		5τ
$u_k(t), B$									
$u_L(t), B$									
$i(t), mA$									
$u_k(t), B$									
$u_L(t), B$									
$i(t), mA$									

Таблиця 10.3 – Результати розрахунку перехідного процесу

№ дос- ліду		Виміряно		Розраховано	
		U_m, B	u_y, B	τ, c	Перехідна функція $f(t)$
10.4.5	$\Gamma \Pi I$				
10.4.5	u_{R14}				
10.4.7	u_L				
10.4.7	i_L				
10.4.9	u_{R14}				
10.4.9	u_L				
10.4.9	i_L				

10.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

10.5.1 За графіками зміни напруги для кожного з дослідів визначити сталу часу τ . Для цього потрібно провести дотичну до відповідної кривої $u(t)$ в точці, що відповідає моменту часу $t=0$ та продовжити її до перетину з лінією, що відповідає усталеній складовій напруги u_y . В цій точці якраз $t = \tau$. Результати занести в таблицю 10.3.

10.5.2 Записати в алгебраїчній формі перехідні функції зміни напруги на затискачах резистора **R14** за результатами дослідів 10.4.5 та 10.4.9 та занести їх в таблицю 10.3.

$$u_{R14}(t) = R14 \cdot I_y (1 - e^{-t/\tau}) \quad (10.21)$$

10.5.3 Записати в алгебраїчній формі перехідні функції зміни напруги на затискачах котушок індуктивності $u_k(t)$ за результатами дослідів 10.4.5 та 10.4.9. Ці функції містять у собі дві складові (див. рисунок 10.6) та занести їх в таблицю 10.3:

$$u_k(t) = u_{Rk}(t) + u_L(t) \quad (10.22)$$

Активна складова зміни напруги на котушці індуктивності:

$$u_{Rk}(t) = U_y (1 - e^{-t/\tau}) .$$

Реактивна складова зміни напруги на котушці індуктивності:

$$u_L(t) = U_m \cdot e^{-t/\tau} .$$

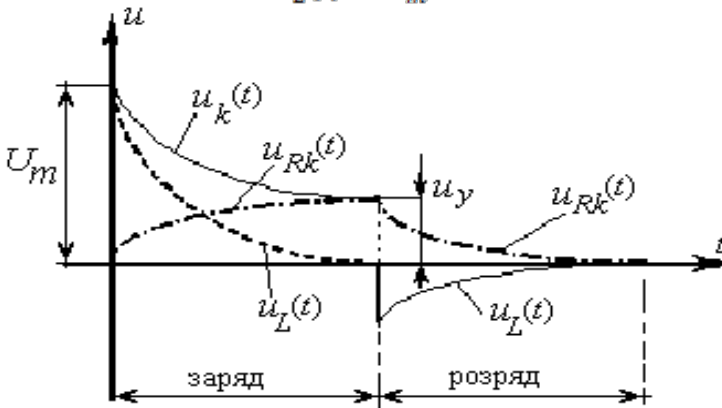


Рисунок 10.6 – Графіки зміни напруги на котушці індуктивності та її складових

10.5.4 Пересвідчитись, що активний опір котушки індуктивності R_k та активний опір резистора R_{14} відносяться один до одного як відповідні усталені складові їхньої напруги:

$$R_k = R_{14} \cdot \left(\frac{u_{yk}}{u_{yR14}} \right). \quad (10.23)$$

10.5.5 Зробити висновки по роботі.

10.6 Контрольні запитання

10.6.1 Дати визначення перехідних та усталених режимів роботи електричного кола.

10.6.2 В яких електричних колах і при яких умовах виникають перехідні процеси?

10.6.3 Що таке вільні та усталені складові струми та напруги? Як вони визначаються.

10.6.4 Сформулюйте перший та другий закони комутації. Дати їм пояснення.

10.6.5 Що називається початковими умовами? Як вони визначаються?

10.6.6 Які початкові умови називаються незалежними, а які залежними?

10.6.7 Як визначаються сталі інтегрування у виразах перехідних струмів та напруги?

10.6.8 Який фізичний зміст мають сталі часу та від чого вони залежать?

10.6.9 Який чином пов'язані між собою сталі часу перехідного процесу та корені характеристичного рівняння?

10.6.10 Яка тривалість перехідного процесу та від чого вона залежить?

10.6.11 Як протікають перехідні процеси при підключенні котушки індуктивності до джерела з постійною ЕРС?

Лабораторна робота №11 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З КОНДЕНСАТОРОМ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ EWB

Мета роботи: оволодіння навичками розрахунку та дослідження електричних кіл постійного струму з конденсатором у перехідному режимі роботи.

11.1 Короткі теоретичні відомості

11.1.1 Основні визначення.

У випадку різних комутацій, тобто миттєвої зміни параметрів або схеми електричного кола (наприклад, вмикання чи вимикання всього кола, або окремих його частин) відбувається перехід з одного усталеного режиму в інший усталений режим. При цьому виникають зміни струми та напруги, які супроводжуються електромагнітними явищами, що поєднуються терміном "перехідний процес". Перехідні процеси можуть виникати тільки у колах з індуктивними та ємнісними елементами, які можуть накопичувати енергію у вигляді енергії магнітного або електричного поля.

11.1.2 Підключення конденсатора до джерела постійної ЕРС.

Будемо вважати, що до замикання ключа Q конденсатор був не заряджений, тобто маємо нульові незалежні початкові умови

$$\begin{aligned} q(0-) &= 0, \\ u_C(0-) &= 0. \end{aligned} \tag{11.1}$$

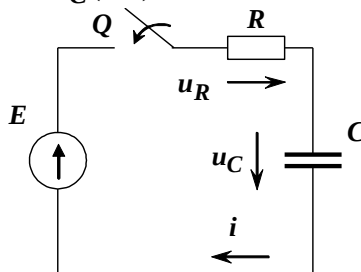


Рисунок 11.1 – Схема електричного кола з конденсатором

У результаті комутації ключ Q замкнувся й утворився контур. Складемо для нього рівняння за другим законом Кірхгофа

$$u_R + u_C = E, \tag{11.2}$$

або з обліком того, що $u_R = Ri$ й $i = C \frac{du_C}{dt}$, одержимо:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E. \quad (11.3)$$

Рішення шукаємо у вигляді суми двох складових

$$u_C = u_{C_y} + u_{C_\epsilon}. \quad (11.4)$$

Для усталеного напруги маємо неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку

$$RC \frac{du_{C_y}}{dt} + u_{C_y} = E \quad .. \quad (11.5)$$

ЕРС постійна, тому всі сталі електричні величини (у тому числі й напруга на ємнісному елементі) будуть також постійні. Тоді

$$\frac{du_{C_y}}{dt} = 0. \quad (11.6)$$

Отже, резистивний елемент не впливає на значення усталеної складової напруги на ємнісному елементі

$$u_{C_y} = E. \quad (11.7)$$

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

$$RC \frac{du_{C_\epsilon}}{dt} + u_{C_\epsilon} = 0. \quad (11.8)$$

Перейдемо від диференціального рівняння до алгебраїчного характеристичного рівняння:

$$RC \cdot p + 1 = 0. \quad (11.9)$$

Вирішуючи характеристичне рівняння, одержимо

$$p = -\frac{1}{RC}. \quad (11.10)$$

Отже, вільна складова напруги на конденсаторі має вигляд

$$u_{C_\epsilon} = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{1}{RC}t}, \quad (11.11)$$

де A – постійна інтегрування;

e – основа натурального логарифму;

p – корінь характеристичного рівняння.

Об'єднаємо сталу й вільну складові разом

$$u_C = E + Ae^{pt}. \quad (11.12)$$

До комутації при $t = 0$ – конденсатор не був заряджений. За другим законом комутації безпосередньо після замикання ключа напруга на ємнісному елементі зберігає значення

$$u_C(0-) = i_C(0+) = 0. \quad (11.13)$$

$$\text{Отже, при } t = 0+ \text{ маємо: } 0 = E + A. \quad (11.14)$$

$$\text{Звідси} \quad A = -E. \quad (11.15)$$

Отже, поєднуючи рішення для сталої й вільної складової, одержимо перехідну напругу на ємнісному елементі

$$u_C = E - Ee^{pt} = E - Ee^{-\frac{1}{RC}t}. \quad (11.16)$$

Постійна часу

$$\tau = \frac{1}{|p|} = RC. \quad (11.17)$$

Струм у контурі

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left(E - Ee^{-\frac{1}{RC}t} \right) = \frac{E}{R} e^{-\frac{1}{RC}t}. \quad (11.18)$$

Напруга на резистивному елементі;

$$u_R = Ri = R \frac{E}{R} e^{-\frac{1}{RC}t} = Ee^{-\frac{1}{RC}t}. \quad (11.19)$$

З перебігом часу спад напруги на ємності зростає, а спад напруги на резистивному елементі (і струм у колі) зменшується за аперіодичним законом, асимптотично наближаючись до усталеного значення.

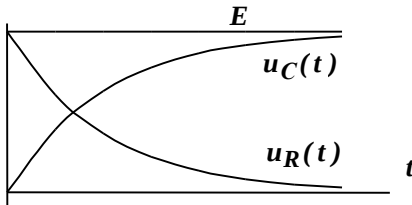


Рисунок 11.2 – Графіки зміни миттєвих значень напруги у колі з резистивним й ємнісним елементами

11.2 Порядок проведення підготовчої роботи

11.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

11.2.2 Детально ознайомитися з основами роботи електронної моделі осцилографа в Electronics Workbench.

11.2.3 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схема електричного кола (рис. 11.3), таблиця 11.1 та розрахунок за п. 11.2.4.

11.2.4 Розрахувати перехідний струм та напругу на ємнісному елементі у електричному колі (рис. 11.1), якщо задано:

$$E = 10 \text{ Ом}, \quad R = 100 + 10n, \quad C = n \text{ мкФ},$$

де n - номер варіанту згідно з журналом групи.

Побудувати графіки залежності $u_C = f(t)$, $i = f(t)$.

11.3 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи в середовищі EWB використовуються:

- генератор прямокутних імпульсів (Clock);
- ключ, що керований клавішею [Space];
- резистор R ;
- конденсатор C ;
- заземлювачі (Ground);
- осцилограф.

11.4 Порядок проведення роботи

11.4.1 Включити в роботу програму Electronics Workbench звичайним шляхом.

11.4.2 В робочому полі EWB зібрати схему дослідження конденсатора під час перехідного процесу (на зразок рисунку 11.3).

Встановити вихідні параметри кожного елемента схеми шляхом подвійного кліка маніпулятором на обраних елементах (закладка Label; Properties, інші – залишаємо за замовчуванням):

- Генератор прямокутних імпульсів (від 30 до 600 Гц. Заповнення 50%. Амплітуду напруги – від 3 до 600 Вольт);
- Резистор R (від 50 до 200 Ом);
- Конденсатор C (від 50 до 200 мкФ);

- Осцилограф – на осі X (розгортка часу) – від 1 мс /поділку; на осі Y (розгортка амплітуди) – відповідно до напруги генератора від 2 до 200 V /поділку. Застосувати виміри із “Відкритим входом” (DC). Вхід A осцилографа підключити на вихід «+» генератора прямокутних імпульсів.

В подальшому всі параметри треба корегувати для отримання найкращих результатів.

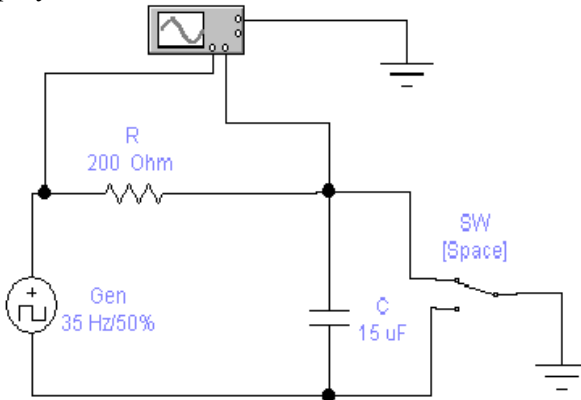


Рисунок 11.3 – Приклад схеми, призначеної для дослідження перехідного процесу в електричному колі з резистором і конденсатором

11.4.3 Увімкнути схему в роботу клавішею активації .

11.4.4 На екрані осцилографа з'явиться рухомий імпульс, який потрібно зупинити. Для цього відкриваємо у верхньому меню Analysis Options (або просто: $Ctrl+Y$) і в закладці Instruments розділу «Oscilloscope» поставимо мітки в віконцях «Pause after each screen» і «Generate time steps automatically» і натиснемо OK . Після цього на екрані з'явиться стабілізоване зображення імпульсів. Наступне (в часі) зображення за потреби можна відкрити клавішею $F9$.

11.4.5 Замалювати у масштабі з екрана осцилографа графік зміни напруги на затискачах $III\ u(t)$ (Вхід A) і напругу на конденсаторі $u_c(t)$ (Вхід B). З цих графіків визначити амплітуди вхідної напруги U_m і напруги на ємності U_{Cm} . Результати вимірів у 9 точках напруги u_c і напруги джерела (за допомогою курсорів 1 або 2 на екрані осцилографа) занести до таблиці 11.2.

11.4.6 Зупинити роботу схему активатором O/I .

11.4.7 Натиснути правою кнопкою миші на ключів SW у робочій схемі і клавішею «Пробіл» (Space) переключити ключ в інше положення. Включити схему в роботу активатором О/І.

При цьому Вхід А осцилографа вимірює напругу на активному опорі. Вхід В – вказує напругу на заземленні, отже нуль.

Результати вимірів напруги на активному опорі $u_R(t)$ занести до таблиці 11.1. Розрахувати струм $i(t)$ в схемі в кожній точці часу спостереження занести результати в таблицю 11.1 (за законом Ома). Занести всі виміри і розрахунки до таблиці 11.1

11.4.8 Зупинити роботу схему активатором О/І.

11.4.9 Змінити величину ємності C в електричному колі на вдвічі більше (або менше) від початкової (подвійний клік на конденсаторі, закладка Value). Повторити виміри (як в п. 11.4.5; 11.4.7) і розрахувати параметри. Занести їх до нижньої частини таблиці 11.1.

Таблиця 11.1 – Результати дослідження перехідного процесу

	t, c	0		τ		2τ		3τ		5τ
11.4.5; 11.4.7	$u_C(t), B$									
	$u_R(t), B$									
	$i(t), mA$									
11.4.9	$u_C(t), B$									
	$u_R(t), B$									
	$i(t), mA$									

Таблиця 11.2 – Результати розрахунку перехідного процесу

№ дос- лід		Виміряно		Розраховано	
		U_m, B	u_y, B	τ, c	Перехідна функція $f(t)$
10.4.5	ГПІ				
10.4.7	u_R				
10.4.5	u_C				
10.4.7	i_C				
10.4.9	u_R				
10.4.9	u_C				
10.4.9	i_C				

11.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

11.5.1 За графіками зміни напруги для кожного з дослідів визначити сталу часу τ . Для цього потрібно провести дотичну до відповідної кривої $u(t)$ в точці, що відповідає моменту часу $t=0$ та продовжити її до перетину з лінією, що відповідає усталеній складовій напруги u_y . В цій точці якраз $t=\tau$. Результати занести в таблицю 11.2.

11.5.2 Записати в алгебраїчній формі перехідні функції зміни напруги на затискачах резистора R за результатами дослідів 11.4.5 та 11.4.9 та занести їх в таблицю 11.2.

$$u_R = U_m e^{-t/\tau}. \quad (11.20)$$

11.5.3 Записати в алгебраїчній формі перехідні функції зміни напруги на затискачах конденсатора $u_C(t)$ і струму $i(t)$ за результатами дослідів 11.4.7 та 11.4.9.

$$i_C = \frac{U_m}{R} (1 - e^{-t/\tau}). \quad (11.21)$$

11.5.4 Зробити висновки по роботі.

11.6 Контрольні запитання

11.6.1 Дати визначення перехідних та усталених режимів роботи електричного кола.

11.6.2 В яких електричних колах і при яких умовах виникають перехідні процеси?

11.6.3 Що таке вільні та усталені складові струми та напруги? Як вони визначаються?

11.6.4 Сформулюйте закони комутації. Дати їм пояснення.

11.6.5 Що називається початковими умовами? Як і для чого вони визначаються?

11.6.6 Які початкові умови називаються незалежними, а які залежними?

11.6.7 Як визначаються сталі інтегрування у виразах перехідних струмів та напруги?

11.6.8 Який фізичний зміст мають сталі часу та від чого вони залежать?

11.6.9 Яка тривалість перехідного процесу та від чого вона залежить?

11.6.10 Як протікають перехідні процеси при підключенні конденсатора до джерела з постійною ЕРС?

Лабораторна робота №12

КОТУШКА ІНДУКТИВНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити залежність електричних параметрів котушки індуктивності від кількості витків та прикладеної до неї напруги.

12.1 Короткі теоретичні відомості

12.1.1 Основні визначення

Котушка індуктивності являє собою намотаний на жорсткий каркас ізолюваний провід з відомою кількістю витків - w (обмотку). Якщо каркас виконано з феромагнітного матеріалу або в середину каркаса вставлено осердя з феромагнітного матеріалу, то котушка індуктивності називається котушкою зі сталевим осердям. Якщо при виготовленні котушки індуктивності феромагнітні матеріали не використовувались, то вона називається котушкою без сталевих осердя.

Якщо через котушку протікає струм, то він створює в навколишньому просторі магнітне поле. Якщо струм постійний, то і магнітне поле – постійне. Його можна характеризувати магнітним потоком Φ - сукупністю ліній вектора індукції B через обмежену замкненим контуром поверхню.

Потокозчеплення котушки дорівнює алгебраїчній сумі магнітних потоків, що пронизують окремі витки обмотки

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_n = \sum_{k=1}^n \Phi_k . \quad (12.1)$$

Одиниця виміру магнітного потоку та потокозчеплення в системі СІ - вебер (Вб).

Якщо всі витки котушки пронизує однаковий магнітний потік, то

$$\Psi = w\Phi . \quad (12.2)$$

Коефіцієнт пропорційності між власним потокозчепленням котушки та струмом котушки називають власною індуктивністю або коротше індуктивністю

$$L = \frac{\Psi}{i} . \quad (12.3)$$

Індуктивність залежить від геометричних розмірів котушки, кількості витків та магнітного опору кола.

Одиниця виміру індуктивності в системі СІ - генрі (Гн).

12.1.2 Котушка без осердя у колі змінного струму

Індуктивний елемент - ідеалізований пасивний елемент, який здатен збуджувати в просторі магнітне поле при проходженні по ньому електричного струму та запасати енергію магнітного поля, причому перетворення електричної енергії в інші види енергії в ньому не відбувається. Найбільш наближеним до нього реальним елементом є котушка індуктивності.

На відміну від індуктивного елемента в котушці індуктивності електрична енергія не тільки запасається, але й перетворюється в інші види енергії (наприклад, у відповідності з законом Джоуля-Ленца, у тепло). Тому схема заміщення котушки індуктивності складається з двох послідовно з'єднаних елементів: індуктивного та резистивного.

Повний опір котушки індуктивності без осердя у колі синусоїдного струму є лінійним і складається з двох частин: індуктивного опору, що залежить від частоти джерела живлення й індуктивності котушки та активного опору, який залежить розмірів та матеріалу проводу котушки

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} . \quad (12.4)$$

Параметри котушки індуктивності визначаються за дослідними даними у відповідності з наступними формулами:

- повний опір

$$Z = \frac{U}{I} ; \quad (12.5)$$

- активний опір

$$R = \frac{P}{I^2} ; \quad (12.6)$$

- індуктивний опір

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} ; \quad (12.7)$$

- індуктивність

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} ; \quad (12.8)$$

- коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{R}{Z} . \quad (12.9)$$

12.2 Порядок проведення підготовчої роботи

12.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

12.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схема електричного кола (рис. 12.1), таблиці 12.2, 12.3.

12.3 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи на стенді використовуються:

- джерело енергії змінного напруги;;
- котушка без сталевго осердя ***L1, L2, L3, L4***;
- амперметр А;
- вольтметр ***V1; V2***; .

Параметри котушки без сталевго осердя: , що з'єднані різними затискачами $L1 = 300 \text{ мГн}$, $L2 = 100 \text{ мГн}$, $L3 = 50 \text{ мГн}$, $L4 = 20 \text{ мГн}$.
Задаємо напругу від 10 до 100 В. $R_{K1} = 30 \text{ Ом}$; $R_{K2} = 40 \text{ Ом}$; $R_{K3} = 50 \text{ Ом}$; $R_{K4} = 60 \text{ Ом}$ (рис. 12.1).

12.4 Порядок проведення роботи

12.4.1 Скласти у ЕВМ електричне коло за схемою рис. 12.2. Найменування котушки, яку потрібно дослідити, наведено у табл. 12.1.

Таблиця 12.1 - Найменування клем досліджуваної котушки

№ бригади	1	2	3	4	5	6
Найменування клем котушки	<i>L1</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>

Результати вимірів записати в таблицю 12.2.

Таблиця 12.2 - Результати дослідження котушки без сталевго осердя з постійною кількістю витків

<i>U</i> , В	0	100	50	20	10	5
<i>I</i> , А	0					

Змінюючи напругу виміряти силу струму .

Результати вимірювань занести до таблиці 12.2.

12.4.2 Змінюючи кількість витків котушки, яку досліджуємо, виміряти силу струму й напругу на її затискачах (*L1, L2, L3, L4*).

Результати вимірів записати в таблицю 12.3

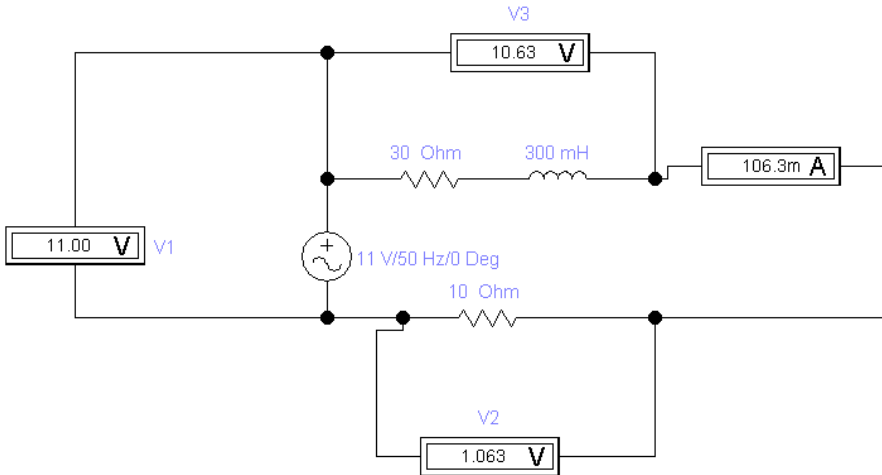


Рисунок 12.1 - Схема електричного кола для дослідження котушки L1 (L2, L3, L4) без осердя

Таблиця 12.3 - Результати дослідження котушки без сталевго осердя зі змінною кількістю витків

Найменування клем котушки	Виміряно				Обчислено			
	U_1 , В	I , А	U_2 , В	U_3 , В	R , Ом	X_L , Ом	$\cos \varphi$	Z , Ом
L1								
L2								
L3								
L4								

12.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

12.5.1 За даними табл. 12.2 побудувати вольт-амперні характеристики досліджуваних котушок.

12.5.2 За даними табл. 12.3 розрахувати параметри котушки при різній кількості витків і побудувати графіки залежностей, $Z=f(n)$, $R=f(n)$ $X_L=f(n)$, $\cos \varphi =f(n)$, $L=f(n)$

$$\left. \begin{aligned} L &= \left(\frac{D}{10} \right)^2 \cdot n^2 / (4.5 \cdot D + 10 \cdot I), \\ \cos(\alpha) &= \frac{V_2^2 + V_3^2 - V_1^2}{2 \cdot V_2 \cdot V_3}, \\ \varphi &= 180^\circ - \arccos(\alpha) \end{aligned} \right\}, \quad (12.10)$$

де: L – індуктивність, мГн;

D – діаметр котушці, мм, 40 мм;

I – довжина обмотки котушки, мм, 80 мм;

n – кількість витків.

12.5.3 Зробити висновки по роботі.

12.6 Контрольні запитання

12.6.1 Як влаштовані котушки індуктивності? Їхні особливості?

12.6.2 Дайте визначення термінам: "індуктивність", "потокозчеплення".

ЛІТЕРАТУРА

1. Паначевский Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Теорія і практикум. К.: Каравела, 2003. – 440 с.
2. Маліновський С.М. Загальна електротехніка: Підручник. – Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2003. 640 с.
3. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории электрических цепей. М.: Высшая школа, 1990. – 543с.
4. Мілих В.І. Електротехніка та електромеханіка. К.: Каравела, 2005. – 376 с.
5. Качан Ю.Г. Лінійна електротехніка (теоретичні основи). Запоріжжя: - видавництво ЗДІА, 1995. – 206 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи., - М.: Высшая школа, 1988. – 480 с.
7. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники Ч.1. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 454 с.
8. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.
9. Козлов В.В., Набокова О.В. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими у лінійних електричних колах. - Запоріжжя: - видавництво ЗНТУ, 2015. - 284 с.
10. Влах, И. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем [Текст] / И. Влах, К. Сингхал. - М.: Радио и связь, 1988. -560 с.
11. Чуа Л.О. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы [Текст] / Л. О. Чуа, Пен-Мин. Лин: пер. с англ. - М.: Энергия, 1980. - 640 с.
12. Тиховод С. М. Розрахунок перехідних процесів в трансформаторах на підставі магнетоелектричних схем заміщення з використанням поліномів Чебишева. Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2.
13. Токмаков И. В. Моделирование электромеханических переходных процессов в асинхронных двигателях на основе использования полиномов чебышёва / И. В. Токмаков //

- Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 35-41.
14. Тиховод С. М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус, Д. Г. Паталах // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 48-54.
 15. Тиховод, С.М. Розрахунок перехідних процесів в електричних колах з розкладанням похідної функції за Тиждень науки-2021. Електротехнічний факультет: щоріч. наук. - практ. конф. 13-17 квітня 2020 р.: тези доп. Запоріжжя : НУ "Запорізька політехніка", 2020. - С. 168-172
 16. Козлов, В. В. Використання таблиць Excel при вивченні дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» / В. В. Козлов, О. В. Набокова // Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем: І Всеукр. наук. - практ. інтернет-конф. пам'яті В. В. Овчарова 20 травня 2020 р. - Режим доступу: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/14439>.
 17. 20. Kozlov, V The using of electronic Excel tables in the study of electrotechnical disciplines as a means of development of informational competence of of future engineers [Текст] / V. Kozlov, O. Nabokova. // Education in the post-coronavirus world: the place of information and innovative technologies: Monograph / Publishing House of Katowice School of Technology, 2020. - С. 53-65.
 18. Козлов, В. В. Побудова векторних діаграм для трифазних електричних кіл за допомогою пакету MathCad / В. В. Козлов, С. С. Кліщенко // Тиждень науки-2019. Електротехнічний факультет: щоріч. наук. - практ. конф. 15-19 квітня 2019 р.: тези доп. / Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. - С. 153-155.
 19. Романіченко, Г. М. Дослідження перехідних процесів за

допомогою системи Electronics Workbench (EWB) / Г. М. Романіченко, М. С. Григоренко // Тиждень науки-2021. Електротехнічний факультет: щоріч. наук. - практ. конф. 19-23 квітня 2021 р.: тези доп. Запоріжжя : НУ "Запорізька політехніка", 2021. - С. 196-197.