

**Українська державна академія залізничного транспорту**

**Факультет автоматики, телемеханіки та зв'язку**

**Кафедра електротехніки та електричних машин**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання лабораторних робіт з дисципліни  
«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»**

**для студентів напрямку підготовки 6.092202**

**«ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ»**

**та напрямку підготовки 6.092201**

**«ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ  
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ»**

**всіх форм навчання**

**Частина 2**

Харків 2014

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електротехніки та електричних машин 26 березня 2014р., протокол № 9.

Рекомендуються для студентів напряму підготовки 6.092202 «Електричний транспорт» та напряму підготовки 6.092201 «Електричні системи та комплекси транспортних засобів» всіх форм навчання.

Укладачі:

доценти С.М. Тихонравов,  
О.Є. Зінченко

Рецензент

доц. О.М. Прогонний

## ЗМІСТ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8. Дослідження з'єднання «зіркою» споживачів трифазного струму.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9. Дослідження електричного кола періодичного несинусоїдного струму.....	10
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10. Дослідження котушки без осердя та з осердям при змінному струмі.....	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 11. Дослідження явища ферорезонансу напруг.....	25
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 12. Дослідження перехідних процесів у лінійному електричному колі, що містить активний опір, котушку індуктивності та конденсатор.....	31
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	34

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8

### Дослідження з'єднання "зіркою" споживачів трифазного струму

**Мета роботи:** визначення напруг і струмів трифазного навантаження, з'єданого "зіркою", при різних режимах роботи та побудування векторних діаграм.

#### Пояснення до роботи

Трифазним електричним колом називають сукупність трьох однофазних кіл змінного струму, в яких діють джерела ЕРС однакової амплітуди та частоти, зсунуті по фазі відносно одне одного на  $120^\circ$ .

Розрізняють з'єднання трифазного кола "зіркою" та "трикутником", що дає змогу зменшити число провідників, які йдуть від генератора до приймача, з шести (при незв'язаній системі) до чотирьох або трьох (три зворотних провідники незв'язаної системи замінюють одним нейтральним провідником при з'єднанні "зіркою").

До трифазної мережі можуть бути підключені як трифазні, так і однофазні приймачі електроенергії. Однофазними приймачами є освітлювальні лампи, електропобутова техніка, електромагніти, деякі типи електродвигунів (однофазні) та ін.

Трифазний приймач можна розглядати в загальному випадку як пристрій, який складається з трьох опорів, включених за схемою "зірка" або "трикутник", який одержує енергію від трифазного генератора. Трифазними приймачами є, наприклад, трифазні асинхронні двигуни, випрямлячі, перетворювачі та ін.

Розрізняють фази генератора, приймача і з'єднувальної лінії між ними. Фази прийнято позначати буквами  $A, B, C$ . Об'єднавши у вузол  $O$  (нульова точка генератора) кінці  $X, Y, Z$  трьох обмоток трифазного генератора, отримаємо з'єднання "зіркою", початки обмоток служать при цьому фазними виводами  $A, B, C$  генератора.

Аналогічно отримується з'єднання "зіркою" трьох навантажувальних опорів  $Z_A, Z_B, Z_C$ : з'єднується по одному виводу навантажувальних опорів у вузол  $O'$  (нульова точка приймача), їх другі виводи утворюють фазні виводи  $A', B', C'$

відповідно. З'єднавши виводи  $A, B, C$  генератора з виводами  $A', B', C'$  приймача трьома провідниками лінії передачі, отримаємо трипровідне трифазне коло. При з'єднанні при цьому нульової точки  $O$  генератора з нульовою точкою  $O'$  приймача провідником (який називається нульовим або нейтральним) отримаємо чотирипровідне трифазне коло (рисунок 8.1).

Згідно з першим законом Кірхгофа вектор струму нейтрального провідника:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

Згідно з другим законом Кірхгофа зв'язок між векторами фазових та лінійних напруг має такий вигляд:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A$$

де  $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$  – вектори лінійних напруг ( $U_L$ );

$\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  – вектори фазних напруг ( $U_\phi$ ).

Для з'єднання "зіркою" справедливе таке співвідношення між діючими значеннями фазних та лінійних струмів:  $I_\phi = I_L$ .

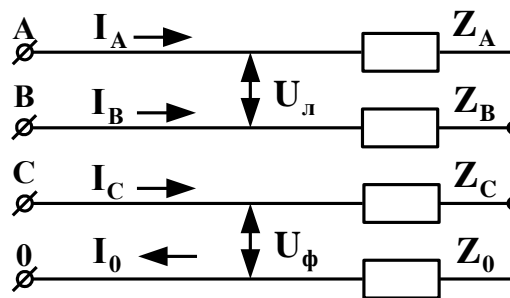


Рисунок 8.1

При наявності нейтрального провідника діючі значення лінійних та фазних напруг зв'язані так:  $U_L = \sqrt{3} U_\phi$ .

Векторна діаграма фазних та лінійних напруг при наявності нейтрального провідника має вигляд, наведений на рисунку 8.2.

Навантаження вважають симетричним, якщо виконується умова:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C .$$

Векторну діаграму при симетричному активно-індуктивному характері навантаження зображено на рисунку 8.3.

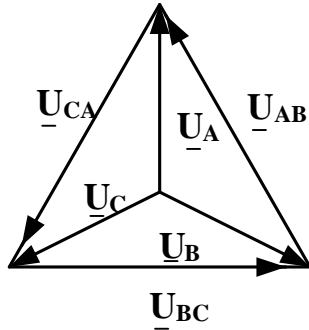


Рисунок 8.2

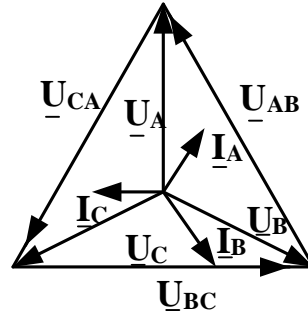


Рисунок 8.3

Тут

$$I_A = I_B = I_C; \quad \underline{I}_0 = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0; \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C .$$

Відключення нейтрального провідника при симетричному навантаженні не приведе до зміни фазних та лінійних струмів та напруг, амплітудних та фазових співвідношень між ними. Таким чином, при симетричному навантаженні наявність або відсутність нейтрального провідника на режим роботи трифазної системи не впливає.

Навантаження вважають несиметричним, якщо  $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$ . Окремим випадком несиметричного навантаження є відключення навантаження однієї або двох фаз. При наявності нейтрального провідника діюче значення напруги на фазах приймача при умові несиметричного навантаження залишається незмінним та

дорівнює  $U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$ . Векторну діаграму струмів та напруг у випадку несиметричного активного навантаження з нульовим провідником, для якого  $R_A < R_B < R_C$ , подано на рисунку 8.4.

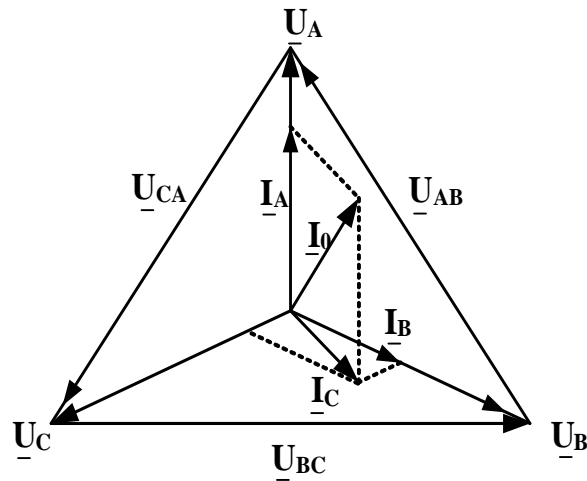


Рисунок 8.4

При зміні навантаження, наприклад однієї із фаз, фазні напруги при наявності нейтрального провідника залишаються незмінними. При цьому змінюється струм у цій фазі та струм у нейтральному провіднику.

Якщо при несиметричному навантаженні обірвати коло нейтрального провідника, то струм  $I_0$  зникне, зміняться фазні напруги на навантаженнях. Виникне так зване зміщення нейтралі. Векторну діаграму для цього випадку наведено на рисунку 8.5.

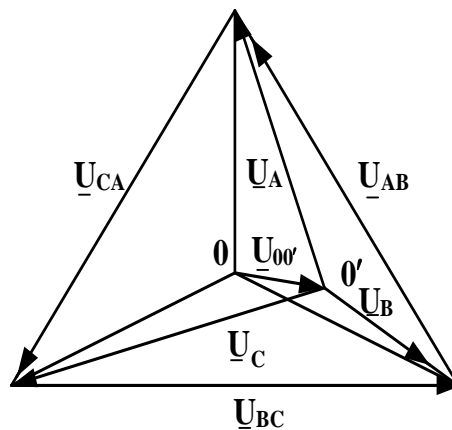


Рисунок 8.5

Як видно з векторної діаграми (рисунок 8.5), при відсутності нейтрального провідника у випадку несиметричного навантаження фазні напруги  $U_\phi \neq \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}$ . Чим більший ступінь

несиметрії, тим більше фазні напруги джерела будуть відрізнятися від фазних напруг на приймачі, що може призвести до аварійних ситуацій. Таким чином, при несиметричному навантаженні нейтральний провідник вкрай необхідний.

Література [2-4].

### **Замітки до виконання лабораторної роботи та побудування векторних діаграм**

1 У роботі досліджується трифазне коло, яке складається з трифазних джерела та навантаження, з'єднаних за схемою "зірка". Досліджується вплив нейтрального провідника на режим роботи трифазного кола при симетричному та несиметричному навантаженні фаз.

2 Для вимірювань у лабораторії натурального експерименту заміри напруг виконують одним вольтметром. Необхідно чітко уявляти, що таке фазні та лінійні напруги джерела й навантаження і як їх вимірювати. Межа вимірювання струму в нейтральному провіднику у випадку несиметричного та неоднорідного навантаження кожної фази не повинна перебільшувати  $2A$ .

3 При виконанні вимірювань у лабораторії комп'ютерного експерименту обмежень у кількості вольтметрів та межі струму не має. На приладах, які використовуються, слід установити робочий режим «АС» (режим змінного струму).

4 Побудування векторної діаграми при несиметричному навантаженні без нейтрального провідника необхідно розпочинати з векторів лінійних напруг  $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$  (вони залишаються незмінними). З точок  $A, B, C$  розхилом циркуля, рівним у масштабі величинам фазних напруг  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ , робляться засічки. Точка перетину трьох засічок - точка  $O'$  - нульова точка навантаження для несиметричного режиму без нейтрального провідника. З'єднавши точку  $O'$  з вершинами трикутника  $A, B, C$ , отримаємо положення векторів фазних напруг  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ . Вектор між точками  $O$  джерела та  $O'$  навантаження - величина зміщення нейтралі у масштабі напруги  $\underline{U}_{OO'}$ . З точки  $O'$  у масштабі струмів будуються вектори фазних



струмів  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  під відповідними кутами  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$  до фазних напруг  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ , які побудовані з урахуванням зміщення нейтралі.

### Робоче завдання

1 Зібрати електричне коло згідно з рисунком 8.6.

2 Дослідити коло в таких режимах:

- симетричний з нульовим проводом та без нульового проводу;

- несиметричний з нульовим проводом та без нульового проводу.

3 Згідно з пунктами 1 - 4 таблиці 8.1 провести вимірювання для всіх перелічених режимів та занести дані у відповідні рядки таблиці 8.1.

4 Зібрати електричне коло згідно з рисунком 8.7.

5 Дослідити трифазне коло у симетричному та несиметричному режимах навантаження з нульовим та без нульового проводу згідно з пунктами 5, 6 таблиці 8.1.

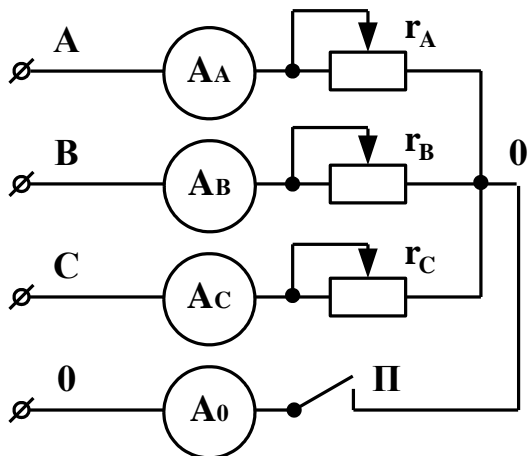


Рисунок 8.6

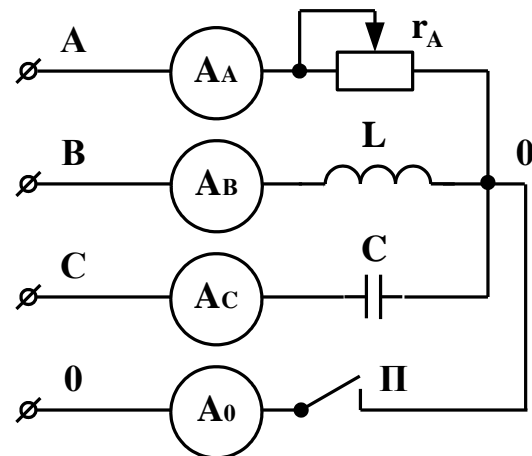


Рисунок 8.7

### Обробка та аналіз одержаних результатів

1 Використовуючи дані вимірювань (таблиця 8.1), побудувати в масштабі векторні діаграми напруг та струмів окремо за даними кожного рядка цієї таблиці.

2 Сформулювати загальні висновки по роботі.

Таблиця 8.1

Рисунок	Характер навантаження	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_0,$ А	$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В
Рисунок 8.6	1 Симетричний з нульовим проводом										
	2 Симетричний без нульового проводу										
	3 Несиметричний з нульовим проводом										
	4 Несиметричний без нульового проводу										
Рисунок 8.7	5 Несиметричний з нульовим проводом (r, L, C)										
	6 Несиметричний без нульового проводу (r, L, C)										

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9

### Дослідження електричного кола періодичного несинусоїдного струму

#### Мета роботи:

а) генерація періодичної несинусоїдної кривої струму шляхом включення в електричне коло дроселя насичення (катушки з феромагнітним осердям);

б) дослідження впливу характеру навантаження на форму кривої вихідної напруги;

в) комп'ютерне моделювання та аналіз властивостей періодичних кривих, що мають симетрію.

## Пояснення до роботи

Періодичними несинусоїдними струмами і напругами називають струми і напруги, які змінюються в часі за періодичним, але несинусоїдним законом.

Будь-яку періодичну функцію  $f(t)$  з періодом  $T$ , що задовольняє умови Діріхле (а в електротехніці усі періодичні функції умови Діріхле задовольняють) можна розгорнути в ряд Фур'є. При цьому несинусоїдну функцію подають у вигляді суми синусоїдних функцій, що мають в загальному випадку різну частоту коливань, різні амплітуди та відмінні початкові фази.

У тригонометричній формі ряд Фур'є записується таким чином:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_1 t + \psi_1) + A_2 \sin(2\omega_1 t + \psi_2) + \dots + \\ + A_K \sin(k\omega_1 t + \psi_K) + \dots = A_0 + \sum_{K=1}^{\infty} A_K \sin(k\omega_1 t + \psi_K),$$

де  $A_0$  – постійна складова ряду (нульова гармоніка);

$A_K \sin(k\omega_1 t + \psi_K)$  –  $k$ -та гармоніка ряду (гармоніка  $k$ -го порядку);

$A_1, A_2, \dots, A_K$  – амплітуди відповідно першої, другої, ...,  $k$ -ї гармонік;

$k\omega_1 t + \psi_K$  – фаза  $k$ -ї гармоніки;

$\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$  – кутова частота першої гармоніки і самої функції

$f(t)$ ;

$\psi_K$  – початкова фаза  $k$ -ї гармоніки.

При розрахунку струмів і напруг при несинусоїдній ЕРС джерела сигналу необхідно розкласти в ряд Фур'є несинусоїдну функцію напруги на виході цього джерела:

$$e(t) = E_0 + E_{1m} \sin(\omega_1 t + \psi_1) + E_{2m} \sin(2\omega_1 t + \psi_2) + \dots \\ \dots + E_{Km} \sin(k\omega_1 t + \psi_K) = e_0(t) + e_1(t) + e_2(t) + \dots + e_K(t).$$

Після цього, використовуючи метод накладання, можна виконати розрахунок струмів і напруг відомими способами для кожної гармоніки окремо. Миттєве значення струмів у будь-якій вітці при цьому дорівнює сумі миттєвих значень струмів від кожної гармоніки:

$$i(t) = i_0 + i_1 + i_2 + \dots + i_k.$$

При розрахунку струмів необхідно керуватись такими правилами:

а) активні опори електричного кола приймають частотонезалежними;

б) постійний струм через конденсатор не проходить, падіння напруги від постійного струму на індуктивності дорівнює нулю;

в) індуктивний опір  $x_L$  зростає прямо пропорційно частоті:

$$x_{L(1)} = \omega_1 L, \quad x_{L(k)} = k\omega_1 L = kx_{L(1)};$$

г) ємнісний опір із збільшенням частоти зменшується:

$$x_{C(1)} = \frac{1}{\omega_1 C}; \quad x_{C(k)} = \frac{1}{k\omega_1 C} = \frac{x_{C(1)}}{k};$$

д) для кожної розрахованої гармоніки можна побудувати векторну діаграму, але не можна додавати вектори напруг і струмів від різних гармонік.

Діюче значення синусоїдного струму - це його середнє квадратичне значення за період:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}, \quad \text{або} \quad I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt.$$

Періодичний несинусоїдний струм дорівнює:

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \sin(\omega_1 t + \psi_1) + I_{2m} \sin(2\omega_1 t + \psi_2) + \dots \\ \dots + I_{km} \sin(k\omega_1 t + \psi_k) + \dots$$

Тому для цього струму

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{T} (I_0^2 T + \sum_{K=1}^{\infty} \frac{1}{2} T I_{Km}^2) = I_0^2 + \sum_{K=1}^{\infty} \frac{I_{Km}^2}{2},$$

тоді

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_K^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{K=0}^{\infty} I_K^2}.$$

Таким чином, діюче значення несинусоїдного струму дорівнює квадратному кореню із суми квадратів постійної складової струму і діючих значень окремих гармонік і не залежить від зсувів фаз  $\psi_K$ .

Аналогічно зі струмом діючі значення напруги та ЕРС:

$$U = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2}; \quad E = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} E_k^2}.$$

Активною потужністю  $P$  несинусоїдного струму є середнє значення миттєвої потужності за період першої гармоніки:

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

Активна потужність несинусоїдного струму визначається як сума активних потужностей окремих гармонік, враховуючи і нульову гармоніку:

$$P = \sum_{K=0}^{\infty} U_K I_K \cos \varphi_K = \sum_{K=0}^{\infty} P_K.$$

Реактивна потужність за аналогією з колами синусоїдного струму:

$$Q = \sum_{K=1}^{\infty} U_K I_K \sin \varphi_K = \sum_{K=1}^{\infty} Q_K .$$

При цьому сума реактивних потужностей окремих гармонік – сума алгебраїчна.

Повну потужність кіл періодичного несинусоїдного струму визначають як:

$$S = UI ,$$

де  $U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_K^2 + \dots}$ ,  $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_K^2 + \dots}$  – діючі значення напруги та струму. При цьому

$$S^2 \neq P^2 + Q^2, \quad S > \sqrt{P^2 + Q^2} ,$$

а величина відмінності у формі кривих струму і напруги характеризується так званою потужністю спотворень:

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} .$$

Якщо в колі є тільки активний опір, то крива струму крізь нього схожа на криву падіння напруги на ньому. Наявність індуктивності або ємності вносить відмінність у формі кривих струму і напруги.

При індуктивності:

$$I_{m(1)} = \frac{U_{m(1)}}{\omega_1 L}, \quad I_{m(K)} = \frac{U_{m(K)}}{k \omega_1 L},$$

тоді

$$\frac{I_{m(K)}}{I_{m(1)}} = \frac{U_{m(K)}}{k U_{m(1)}} ,$$

тобто відношення амплітуд струму  $k$ -ї і першої гармонік у  $k$  разів менше від такого ж відношення амплітуд напруг.

При ємності навпаки:

$$U_{m(1)} = \frac{1}{\omega_1 C} I_{m(1)}, \quad U_{m(K)} = \frac{1}{k\omega_1 C} I_{m(K)},$$

тоді

$$\frac{I_{m(K)}}{I_{m(1)}} = k \frac{U_{m(K)}}{U_{m(1)}}.$$

Таким чином, індуктивність заглушує вищі гармоніки струму, ємність – нижчі. На цих властивостях елементів  $L$  та  $C$ , як елементів дуальних (з протилежними властивостями), будуються схеми реактивних  $LC$ -фільтрів.

Література [2-4].

### Завдання на натурний експеримент

1 Зібрати електричну схему згідно з рисунком 9.1.

2 Після перевірки схеми викладачем установити рукоятку ЛАТР на “0” і увімкнути тумблером джерело “~36 В рег.”

3 До резистора  $R$  під’єднати вхід осцилографа і настроїти його для спостереження форми вхідної напруги  $u_{ex}(t)$  на цьому резисторі. Значення  $R$  дорівнює 5 Ом.

4 Змінюючи значення струму в колі від заданого граничного значення до нуля і навпаки, звернути увагу на епюру напруги  $u_{ex}(t)$  на резисторі  $R$ , форма якої збігається з формою струму, що протікає крізь цей резистор.

5 При заданому значенні струму крізь дросель під’єднати до затискачів 2 - 2' резистор навантаження  $R_n$ . Вхід осцилографа під’єднати до резистора  $R_{dod}$ . Значення  $R_{dod}$  дорівнює 7 Ом. Зарисувати осцилограму  $u_{ex}(t)$ , зняту з резистора  $R$ , і осцилограму  $i(t)$ , зняту з резистора  $R_{dod}$ . Зарисувати осцилограму напруги  $u_{вих}(t)$  на затискачах 2-2'. Змінити значення

резистора навантаження  $R_H$  і повторити вказані вище дії. Порівняти отримані осцилограми  $u_{ex}(t)$  та  $i(t)$  для двох значень  $R_H$  і зробити висновок про вплив величини резистора навантаження  $R_H$  на форму струму крізь цей резистор.

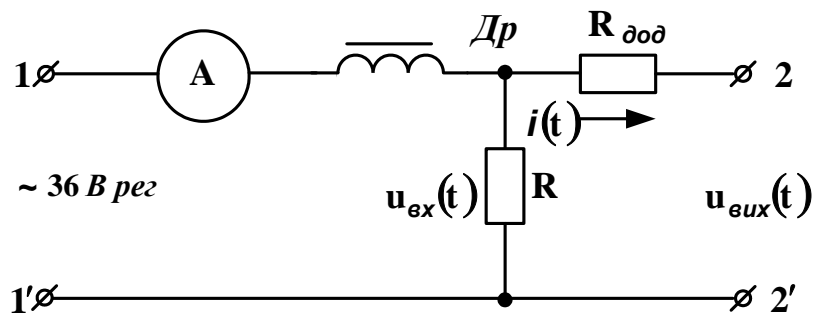


Рисунок 9.1

6 Виконати роботу згідно з пунктом 5, підключаючи на місце резистора навантаження  $R_H$  по черзі котушку індуктивності  $L_H$  з двома значеннями кількості витків  $w_1$  і  $w_2$  та конденсатор  $C_H$  з двома значеннями його ємності  $C_1$  та  $C_2$ . Зробити висновок про вплив на форму струму характеру навантаження ( $R_H, L_H, C_H$ ) та його величини.

### Завдання на комп'ютерне моделювання

1 Зібрати електричну схему згідно з рисунком 9.2.

2 Отримати осцилограми при таких параметрах ЕДС у схемі (рисунок 9.2):

-  $E_1=100$  В,  $f_1=50$  Гц,  $\varphi_1=0^\circ$ ;  $E_2=75$  В,  $f_2=100$  Гц,  $\varphi_2=0^\circ$ ;  $E_3=50$  В,  $f_3=150$  Гц,  $\varphi_3=0^\circ$ ;

-  $E_1=100$  В,  $f_1=50$  Гц,  $\varphi_1=0^\circ$ ;  $E_2=0$  В,  $f_2=100$  Гц,  $\varphi_2=0^\circ$ ;  $E_3=50$  В,  $f_3=150$  Гц,  $\varphi_3=0^\circ$ ;

-  $E_1=100$  В,  $f_1=50$  Гц,  $\varphi_1=90^\circ$ ;  $E_2=75$  В,  $f_2=100$  Гц,  $\varphi_2=90^\circ$ ;  $E_3=50$  В,  $f_3=150$  Гц,  $\varphi_3=90^\circ$ .



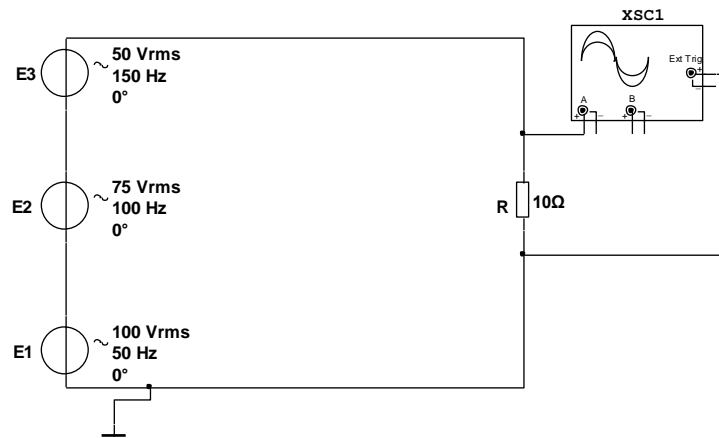


Рисунок 9.2

### Зміст звіту

1 Електричні схеми досліджень і параметри елементів схем, отримані у викладача.

2 Графіки:

а) напруги  $u_{ex}(t)$ , що формує коло, схему якого наведено на рисунку 9.1;

б) струму  $i(t)$  та напруги  $u_{вих}(t)$  для трьох досліджених видів навантаження.

3 Аналіз отриманих результатів; висновки про спотворення дроселем  $Dp$  форми кривої струму і про вплив характеру й величини навантаження на форму кривих струму  $i(t)$  і напруги  $u_{вих}(t)$ .

4 Графіки напруги для трьох досліджених різновидів симетрії.

5 Аналіз отриманих результатів; висновки щодо властивостей періодичних кривих, які мають симетрію.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10

### Дослідження котушки без осердя та з осердям при змінному струмі

Мета роботи:

а) дослідним способом визначити параметри котушки індуктивності без осердя та з осердям;

б) визначити характер залежності параметрів котушки від ряду факторів:

- рівня прикладеної напруги;
- кількості витків котушки;
- матеріалу та виду осердя (сталеве або алюмінієве, суцільне або шихтоване).

### Пояснення до роботи

Індуктивність котушки, ввімкнутої в коло синусоїдного струму, являє собою відношення потокозчеплення ліній магнітного поля до струму, що збуджує це поле:

$$L = \frac{\Psi}{i}.$$

Потокозчеплення можна записати як

$$\Psi = w\Phi = wSB = wS\mu\mu_0H = wS\mu_a \frac{wi}{l} = \frac{w^2i}{\frac{l}{\mu_a S}} = \frac{w^2i}{R_M},$$

де  $w$  – кількість витків котушки;

$\Phi$  – магнітний потік у веберах;

$B$  – магнітна індукція в теслах;

$S$  – поперечний переріз осердя котушки,  $m^2$ ;

$H$  – напруженість магнітного поля в осерді котушки,  $\frac{A}{m}$ ;

$l$  – довжина осердя вздовж його осьової лінії,  $m$ ;

$$R_M = \frac{l}{\mu\mu_0 S} \text{ – магнітний опір кола.}$$

Тоді маємо індуктивність котушки

$$L = \frac{w^2}{R_M} .$$

Отже,  $L$  пропорційна магнітній проникності матеріалу  $\mu$  осердя.

За відсутності в котушці осердя магнітний опір повітря - величина постійна ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,  $\mu \approx 1$ ). Тоді при незмінних геометричних розмірах котушки та фіксованій кількості витків індуктивність котушки без осердя також є величиною постійною.

У котушці зі сталевим осердям магнітний опір осердя  $R_M$  є величиною змінною, він є функцією магнітної проникності сталі, яка зі зростанням струму через котушку спочатку є майже незмінною, а потім, у відповідності до кривої намагнічування  $B = f(H)$ , внаслідок магнітного насичення сталі знижується. Згідно з цим магнітний опір осердя сталі спочатку є майже постійним, а потім зростає. У результаті зміна індуктивності котушки буде мати аналогічний характер, що й зміна магнітної проникності матеріалу осердя.

Внаслідок непостійності індуктивності котушки з феромагнітним осердям її вольт-амперна характеристика носить нелінійний характер (рисунок 10.1, крива лінія). Пунктиром позначена пряма лінія – вольт-амперна характеристика котушки без сталюого осердя.

При протіканні крізь котушку з феромагнітним осердям змінного струму в ній виникає основний магнітний потік  $\Phi_0$ , змінний у часі, який замикається крізь феромагнітне осердя, та потік розсіювання  $\Phi_S$ , який замикається між витками котушки крізь повітря (рисунок 10.2).

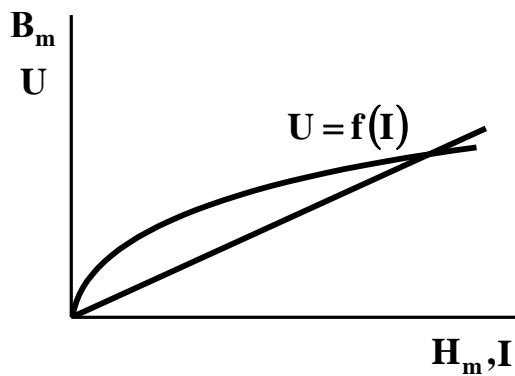


Рисунок 10.1

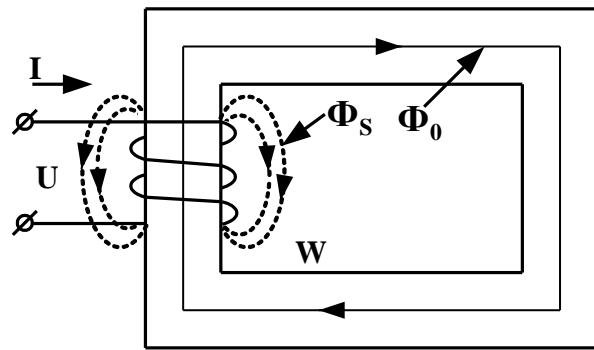


Рисунок 10.2

Протікання змінного магнітного потоку крізь феромагнітне осердя призводить до нагрівання останнього, тобто до незворотних втрат потужності. Ці втрати потужності в осерді («в сталі») позначають як  $P_{cm}$ . Розрізняють два види втрат у осерді:

$P_z$  - спричинені циклічним його перемагнічуванням (вони пропорційні площі петлі гістерезису);

$P_{вс}$  - спричинені вихровими струмами, які виникли у феромагнітному осерді під дією ЕРС. Ці струми індукуються в осерді основним магнітним потоком  $\Phi_S$ .

$$\text{Тому } P_{cm} = P_z + P_{вс}.$$

Наявність втрат в осерді  $P_{cm}$  погіршує енергетичні покази приладів, до складу яких входять такі котушки.

Для зменшення  $P_z$  осердя котушок виготовляється зі спеціальних феромагнітних матеріалів з вузькою петлею гістерезису (її малою площею).

Для зменшення  $P_{вс}$  осердя котушок виготовляють з окремих листів електротехнічної сталі.

З урахуванням того, що певна потужність  $P_m$  витрачається на нагрівання дроту, яким намотано котушку, при змінному струмі котушка з феромагнітним осердям споживає від джерела активну потужність

$$P = P_m + P_{cm}.$$

Ця потужність може бути виміряна за допомогою ватметра. Основний магнітний потік  $\Phi_0$  та потік розсіювання  $\Phi_S$

викликають відповідно в котушці ЕРС самоіндукції та ЕРС розсіювання.

Для аналізу роботи та розрахунку електротехнічних пристроїв користуються схемою заміщення котушки. На рисунку 10.3, а, б подані паралельна та послідовна схеми заміщення котушки з осердям.

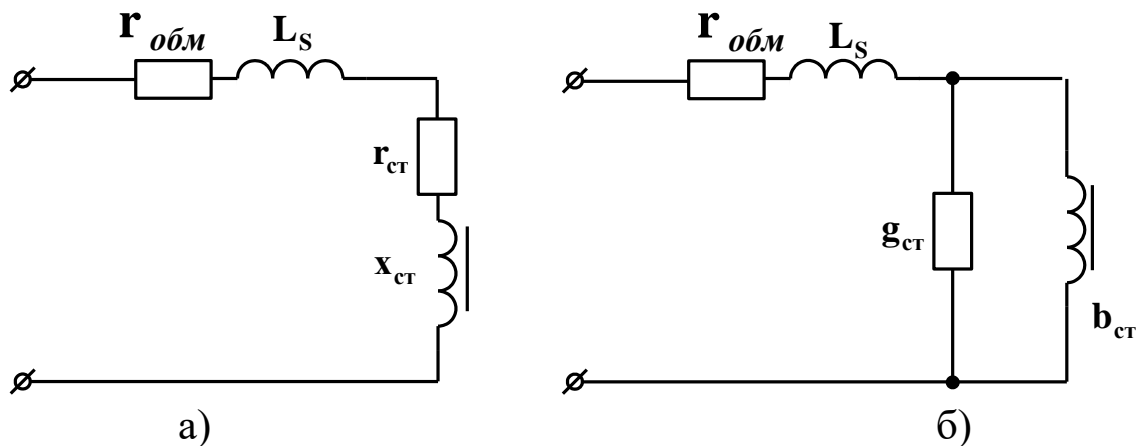


Рисунок 10.3

З основним магнітним потоком  $\Phi_0$  котушки зі сталевим осердям пов'язують індуктивну провідність  $b_{cm}$  паралельної схеми заміщення або індуктивний опір  $x_{cm}$  послідовної схеми заміщення. З магнітним потоком розсіювання  $\Phi_S$  пов'язують індуктивність розсіювання  $L_S$  та відповідно індуктивний опір розсіювання  $x_S$ .

Втрати в осерді враховуються активною провідністю  $g_{cm}$  паралельної схеми заміщення або активним опором  $r_{cm}$  послідовної схеми заміщення. Втрати в обмотці котушки (опір провідника обмотки) визначається опором  $r_{обм}$ .

Напруга, яка прикладена до котушки з феромагнітним осердям, визначається формулою

$$\underline{U} = \underline{I}r_{обм} + j\omega L_S \underline{I} + \underline{U}' ,$$

де  $U' = -E_L$  – складова напруги на котушці, яка обумовлена явищем самоіндукції під дією основного потоку  $\Phi_0$ .

Література [2-4].

### **Робоче завдання**

1 Дослідити питання наявності (або відсутності) залежності параметрів котушки без осердя від діючого значення прикладеної до неї напруги. Результати вимірювань занести до таблиці 10.1.

2 Дослідити залежність параметрів котушки без осердя від кількості витків цієї котушки. Результати вимірювань занести до таблиці 10.2.

3 Дослідити залежність параметрів котушки від матеріалу та конструкції її осердя. Результати вимірювань занести до таблиці 10.3.

### **Замітки до виконання роботи**

1 Для виконання першого дослідження необхідно взяти підносну котушку з максимальною кількістю витків багатосекційної котушки. Для цього з'єднують послідовно та узгоджено першу котушку (клеми  $H_1 - K_1$ ) та другу котушку (клеми  $H_2 - K_6$ ). таким чином утворюють котушку з числом витків  $w_1$ .

Вимірювання та розрахунок виконують старанно, з високим ступенем точності для того, щоб переконатися, чи залежать параметри котушки без осердя (в окремому випадку, величина індуктивності котушки) від напруги, яка подається на затискачі котушки.

2 Наступні дослідження виконують з тією ж котушкою, але з іншою кількістю витків –  $w_2$  та  $w_3$ . При цьому струм в електричному колі обов'язково підтримують однаковим з метою підтвердження залежності індуктивності від кількості витків.

3 За даними експериментів (таблиця 10.2) з визначають співвідношення між кількістю витків котушки та її індуктивністю.

4 До джерела живлення підключають котушку з кількістю витків  $w_1$ . За результатами вимірювань та розрахунків (таблиця 10.1) виконують розрахунок втрат у міді  $P_m$  та втрат у сталі  $P_{cm}$ .

Відомо, що

$$P = P_{ct} + P_m,$$

де  $P_m = I^2 r_{об}$ ;

$r_{об}$  – активний опір котушки, значення якого обчислюють з першого досліду.

Тоді

$$P_{ct} = P - I^2 r_{об}.$$

Таблиця 10.1

Дослід				Розрахунок									Примітка	
$U,$ В	$I,$ А	$P,$ Вт	$f,$ Гц	$z,$ Ом	$r,$ Ом	$x_L,$ Ом	$y,$ См	$b,$ См	$g,$ См	$L,$ Гн	$\cos \varphi$	$\varphi$	Котушка без осердя з кількістю витків $w_1$	

Таблиця 10.2

Дослід				Розрахунок									Примітка	
$U,$ В	$I,$ А	$P,$ Вт	$f,$ Гц	$z,$ Ом	$r,$ Ом	$x_L,$ Ом	$y,$ См	$b,$ См	$g,$ См	$L,$ Гн	$\cos \varphi$	$\varphi$	Котушка без осердя з кількістю витків	
														$w_1$
														$w_2$
														$w_3$

Таблиця 10.3

Матеріал осердя	Дослід				Розрахунок								Примітка
	$U,$ В	$I,$ А	$P,$ Вт	$f,$ Гц	$P_m,$ Вт	$P_{ct},$ Вт	$z,$ Ом	$r_0,$ Ом	$x_L,$ Ом	$L,$ Гн	$\cos \varphi$	$\varphi$	
Стальний суцільний													Котушка без осердя з кількістю витків $w_1$
Стальний дротовий													
Алюмінієвий суцільний													
Алюмінієвий дротовий													

## Аналіз отриманих результатів та висновки

1 Розрахувати параметри котушок та результати розрахунків занести в таблиці 10.1 - 10.3.

2 На підставі даних таблиці 10.1 побудувати графіки залежностей

$$z = f_1(U), r = f_2(U), x = f_3(U), L = f_4(U), \quad \cos \varphi = f_5(U)$$

за умови  $f = const$ ,  $w = const$ .

3 На підставі даних таблиці 10.2 побудувати графіки залежностей

$$z = f_1(w), r = f_2(w), x = f_3(w), L = f_4(w), \cos \varphi = f_5(w)$$

за умови  $f = const$ ,  $I = const$ .

4 Проаналізувати отримані криві та зробити висновки щодо залежності параметрів котушок від величини прикладеної напруги та кількості витків.

5 На підставі таблиці 10.3 зробити висновки щодо впливу на параметри котушки та на втрати в котушці матеріалу та конструкції осердя.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 11

### Дослідження явища ферорезонансу напруг

**Мета роботи:** експериментальне дослідження явища, що спостерігається при послідовному включенні конденсатора і котушки індуктивності із стальним осердям.

#### Пояснення до роботи

Ферорезонанс напруг – це явище, що виникає в електричному колі, складеному з послідовно з'єднаних нелінійної котушки із стальним осердям та конденсатора. Воно полягає в тому, що налаштування такого послідовного LC-кола на резонанс відбувається шляхом зміни напруги на затискачах цього кола і, як наслідок, зміни індуктивності нелінійної котушки. При точному настроюванні на резонанс існує збігання за фазою напруги на затискачах нелінійного LC-кола та першої гармоніки струму крізь це коло.

Явища ферорезонансу напруг на відміну від резонансу напруг у лінійних колах можна досягти шляхом плавної зміни напруги на затискачах кола.

При дослідженні процесів, що протікають у колі, схему якого подано на рисунку 11.1, заміняють несинусоїдні струм і напругу кола еквівалентними синусоїдними. Умовою еквівалентності несинусоїдних і синусоїдних величин приймається рівність їх діючих значень, а зсув фаз між еквівалентними синусоїдами напруги і струму визначається за формулою

$$\varphi = \arccos \frac{P}{UI} ,$$

де  $U$  – діюче значення напруги на вході електричного кола;

$I$  – діюче значення струму;

$P$  – активна потужність несинусоїдного струму.

Якщо одна з величин ( $u$  або  $i$ ) синусоїдна, то еквівалентна синусоїда, що отримана для другої величини, орієнтується по фазі відносно першої.

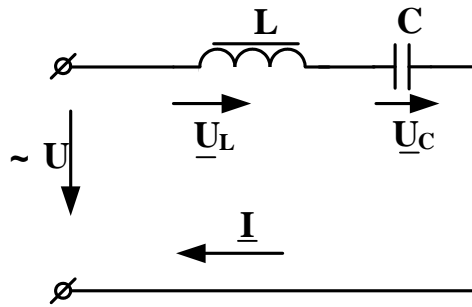


Рисунок 11.1

Такі спрощення дозволяють користуватися векторними діаграмами, робити графічні побудови і в першому наближенні дають достатню для практики точність розрахунку.

Вектори напруг  $\underline{U}_L$ ,  $\underline{U}_C$  (рисунок 11.1) перебувають у протифазі. Тому реактивна складова напруги  $\underline{U}_P$ , що прикладена до послідовно з'єднаних конденсатора і котушки, буде дорівнювати алгебраїчній сумі:

$$\underline{U}_P = \underline{U}_L + \underline{U}_C.$$

Графічна залежність загальної напруги  $\underline{U}$  від струму в колі отримується як різниця ординат вольт-амперних характеристик (ВАХ) нелінійної котушки та конденсатора.

На рисунку 11.2 зображені:

- ВАХ нелінійної індуктивності  $U_L(I)$ ;

- ВАХ лінійної ємності  $U_C(I)$ ;

- ВАХ кола  $U_p(I)$  при послідовному з'єднанні цих елементів, отримана як різниця ординат  $U_L(I)$  та  $U_C(I)$ . Точка перетину ВАХ  $U_L(I)$  та  $U_C(I)$  (точка  $A$  на рисунку 11.2) відповідає ферорезонансу напруг, коли  $U_L(I) = U_C(I)$ .

У момент ферорезонансу в колі протікає струм  $I_0$ , а прикладена напруга  $U_p = U_L - U_C = 0$ , що можливо тільки в електричних колах з ідеалізованими елементами.

Крива  $U_p(I)$  не враховує активного опору обмотки, втрат у сталі, наявність вищих гармонік. Це суто теоретична крива.

Реальна ВАХ кола має вигляд кривої  $U(I)$ , значення  $U$  якої:

$$U = \sqrt{U_P^2 + U_R^2}.$$

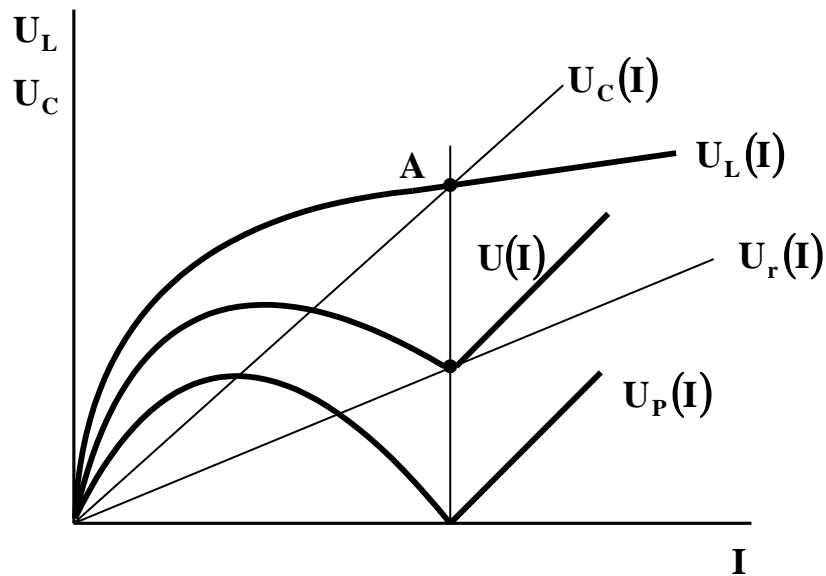


Рисунок 11.2

Зобразимо ВАХ  $U(I)$  окремо і проаналізуємо її (рисунок 11.3). Якщо електричне коло живиться від джерела ЕРС і, починаючи з 0, плавно збільшується напруга  $U$ , то струм  $I$  буде плавно збільшуватися від 0 до  $I_2$ , потім стрибком збільшується до  $I_4$  і далі знову буде плавно зростати. Зняти дослідним шляхом ділянку кривої 2 - 4 не вдається, бо в колі спостерігається тригерний ефект: при незначному збільшенні напруги на вході кола від значення  $U_2$  струм в електричному колі стрибком змінюється від  $I_2$  до  $I_4$ .

При зменшенні напруги на вході кола і досягненні нею значення  $U_1$  (точка 3) струм у колі стрибком зменшується від  $I_3$  до значення  $I_1$  (той же тригерний ефект) і далі при зменшенні  $U$  плавно знижується до 0.

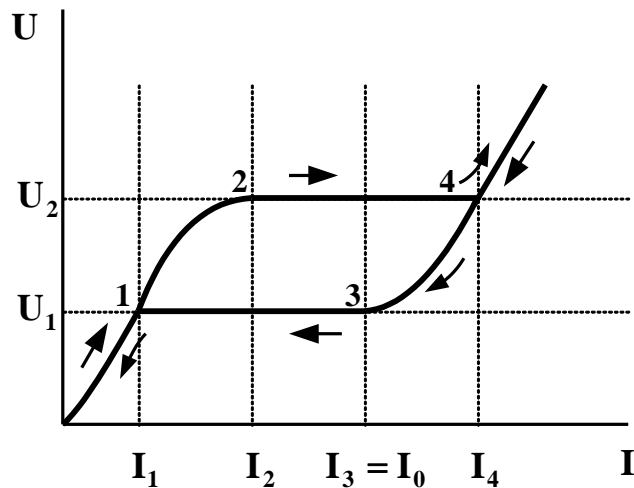


Рисунок 11.3

На ділянці 0-1-2  $U_L > U_C$ . Отже, напруга має індуктивний характер, тобто випереджає струм за фазою, тому зсув фази  $\varphi$  між ними позитивний. При стрибку 2-4 він змінюється на негативний. При зменшенні струму від нескінченності до точки 3 цей зсув залишається негативним, а в ході стрибка 3-1 він миттєво стає позитивним. Такі стрибки фази називають перевертанням фази.

Отримання характеристики  $U(I)$ , зображеної на рисунку 11.2, при всіх значеннях струму можливе тільки при живленні кола від ідеального джерела струму.

При розгляді ферорезонансу під індуктивною складовою напруги мається на увазі складова першої гармоніки.

Рекомендовані літературні джерела – підручники [2-4].

### Підготовка до роботи

1 Вивчити теоретичний матеріал з цієї теми, використовуючи конспект лекцій і відповідні розділи підручника, ознайомитися з методичними вказівками, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту.

2 Відповісти письмово на три запитання (згідно із завданням викладача), відповіді на решту запитань підготувати усно:

- у чому полягає явище ферорезонансу напруг;
- пояснити явище тригерного ефекту;

- які припущення робляться при аналізі процесів у послідовному ферорезонансному колі, що живиться від регульованого джерела напруги або джерела струму;
- як зняти ВАХ котушки з феромагнітним магнітопроводом та конденсатора з постійною ємністю;
- чому напруга зворотного стрибка струму відрізняється від напруги прямого стрибка;
- яке практичне використання послідовних ферорезонансних контурів?

### Робоче завдання

1 Зібрати коло для дослідження ферорезонансу напруг. Як котушку індуктивності зі стальним осердям використовувати дросель, що розміщений на підносному блоці котушок, конденсатор  $C_1$  розташований на лабораторному стенді.

2 Дослідним шляхом підібрати ємність, при якій можливе явище ферорезонансу напруг.

3 Зняти дослідним шляхом ВАХ нелінійної індуктивності  $U_L = f_1(I)$  та ВАХ ємності  $U_C = f_2(I)$ . Результати вимірювань занести в таблиці 11.1 та 11.2.

4 Зняти дослідним шляхом ВАХ послідовного ферорезонансного контуру  $U = f_3(I)$ , заповнити таблицю 11.3.

Таблиця 11.1

$U_L, \text{В}$	0								
$I_L, \text{А}$	0								

Таблиця 11.2

$U_C, \text{В}$	0	
$I_C, \text{А}$	0	

Таблиця 11.3

$U, \text{В}$	0								
$I, \text{А}$	0								

## Методичні вказівки до виконання роботи

1 При виконанні роботи керуватися загальними правилами щодо виконання лабораторних робіт на універсальному лабораторному стенді.

2 Живлення схеми здійснити від джерела “~ 36 В рег.”.

3 При знятті ВАХ кола зафіксувати значення напруг, при яких відбувається прямий і зворотний стрибки струму. Решту вимірів режиму виконувати плавною поступовою зміною напруги (3 - 4 значення до стрибка струму в колі і 3 - 4 значення після нього), спочатку від 0, збільшуючи напругу, а потім до 0, зменшуючи її.

## Аналіз результатів та висновки

1 Побудувати в одній системі координат графіки  $U_L = f_1(I)$ ,  $U_C = f_2(I)$ ,  $U = f_3(I)$ .

2 У цій же системі координат з використанням дослідних даних залежностей  $U_L = f_1(I)$  та  $U_C = f_2(I)$  побудувати ідеалізовану ВАХ послідовного ферорезонансного контуру. Порівняти її з експериментальною характеристикою та пояснити причину їх відмінності. Порівняти значення напруг, при яких настає тригерний ефект, і значення стрибків струму з результатами розрахунку (використовуючи ВАХ експериментального контуру).

3 Зробити висновки по роботі.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 12

**Дослідження перехідних процесів у лінійному електричному колі, що містить активний опір, котушку індуктивності та конденсатор**

**Мета роботи:** експериментальне дослідження характеру перехідних процесів при різних значеннях параметрів кола, що містить активний опір, індуктивний та ємнісний елементи.

### Пояснення до роботи

Перехідні процеси – це процеси переходу від одного усталеного стану до іншого усталеного стану. Зміна параметрів елементів електричного кола або зміна режиму роботи самого кола називаються комутаціями.

Для перехідних процесів справедливі два закони, які називаються законами комутації. У природі дотримується принцип безперервності в часі потокозчеплення індуктивності й електричного заряду ємності.

Потокозчеплення стрибком змінитися не може

$$\Psi(0_+) = \Psi(0_-).$$

Заряд ємності стрибком змінитися не може

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

Отже, за першим законом комутації в перший момент після комутації струм у котушці індуктивності стрибком змінитися не може

$$i_L(0_+) = i_L(0_-);$$

за другим законом комутації в перший момент після комутації напруга на ємності стрибком змінитися не може

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

Величини струмів котушок індуктивності у колі та напруг на всіх конденсаторах кола, що існують у момент комутації,

називають незалежними початковими умовами перехідного процесу.

Аналіз перехідних процесів у лінійних колах зводиться до розв'язання лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь на основі законів Кірхгофа.

Розв'язок лінійного неоднорідного диференціального рівняння є сумою двох складових. Перша з них – частковий розв'язок цього рівняння. Друга – загальний розв'язок лінійного однорідного диференціального рівняння.

Частковий розв'язок обумовлено вимушеною дією джерел енергії. Загальний розв'язок знаходять за відсутності джерел. У цьому випадку струми і напруги називаються вільними і завжди згасають за рахунок втрат у колі. У разі комплексних коренів процеси в колі можуть бути коливальними за рахунок власних коливань у колі, але також зменшуватимуться в часі при додатній дійсній частині.

Література [2-4].

### **Підготовка до роботи**

1 Оформити заготовку до звіту з лабораторної роботи, яка містить назву роботи, мету, робочу схему електричного кола.

2 Вивчити теоретичний матеріал з теми виконуваної роботи.

3 Ознайомитись із робочим завданням і методичними вказівками до виконання роботи.

### **Робоче завдання**

1 Скласти досліджуване коло згідно з рисунком 12.1. Параметри елементів можуть бути довільними.

2 Під'єднати до входу кола генератор прямокутних імпульсів (при використанні комп'ютерного моделюючого середовища, наприклад Multisim, цим генератором є *Function generator*).

3 Під'єднати вхідні шнури осцилографа до котушки (при використанні комп'ютерного моделюючого середовища цим осцилографом є *Oscilloscope*, виводи Channel A та Ground terminal). Спостерегти осцилограму напруги на котушці.

4 Під'єднати вхідні шнури осцилографа до резистора. Спостерегти осцилограму струму на котушці.



5 Скласти досліджуване коло згідно з рисунком 12.2. Параметри елементів можуть бути довільними.

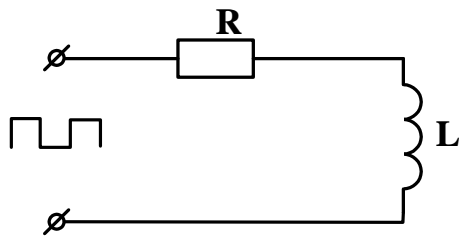


Рисунок 12.1

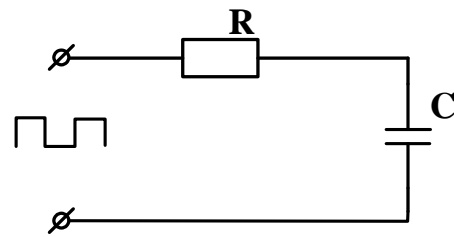


Рисунок 12.2

6 Під'єднати вхідні шнури осцилографа до конденсатора. Спостерігати осцилограму напруги на конденсаторі.

7 Під'єднати вхідні шнури осцилографа до резистора. Спостерігати осцилограму струму на конденсаторі.

8 Скласти досліджуване коло згідно з рисунком 12.3. Встановити параметри схеми такі, що мають забезпечити аперіодичний характер перехідного процесу в колі.

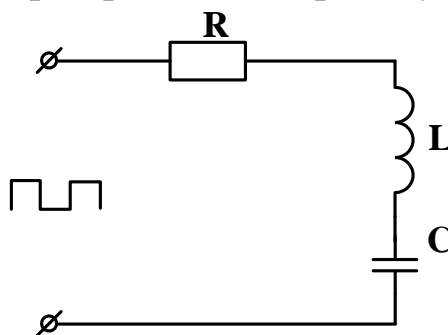


Рисунок 12.3

9. Під'єднати вхідні шнури осцилографа до резистора. Спостерігати осцилограму струму в колі.

10. Скласти досліджуване коло згідно з рисунком 12.3. Встановити параметри схеми такі, що мають забезпечити коливальний характер перехідного процесу в колі.

11. Під'єднати вхідні шнури осцилографа до резистора. Спостерігати осцилограму струму в колі.

### **Аналіз отриманих результатів та висновки**

1 Виявити закономірності впливу параметрів елементів кола на характер перехідного процесу. Навести письмові висновки.

2 Пояснити, навіщо в експериментах потрібен генератор саме періодичної послідовності прямокутних імпульсів.

3 Виявити на осцилограмах ділянки, де візуально спостерігається перехідний процес, і ділянки, де візуально спостерігається лише його примушена складова.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1 Положення щодо організації підготовки, проведення та захисту лабораторних робіт в Українській державній академії залізничного транспорту [Текст]. – Харків: УкрДАЗТ, 2007.

2 Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2000.

3 Електротехніка та електромеханіка систем залізничної автоматики [Текст] / М.М. Бабаєв, М.Г. Давиденко, Г.І. Загарій [та ін.]. – Харків: УкрДАЗТ, 2011.

4 Соболев, Ю.В. Теорія електричних і магнітних кіл [Текст] / Ю.В. Соболев, М.М. Бабаєв, М.Г. Давиденко. – Харків: ХФВ “Транспорт України”, 2002.