



**УКРАЇНЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ**

**Кафедра «Електротехніка та електричні машини»**

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання лабораторних робіт з дисципліни**

***«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ»***

**для студентів спеціальності**

**«СПЕЦІАЛІЗОВАНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ»**

**денної форми навчання**

**Частина 2**

**Харків 2012**

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Електротехніка та електричні машини” 14 вересня 2010 р., протокол № 2.

Укладачі:

доценти М.Г. Давиденко,  
О.М. Ананьєва

Рецензент

проф. Г.І. Загарій

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни

*«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ»*

для студентів спеціальності  
«СПЕЦІАЛІЗОВАНІ КОМП’ЮТЕРНІ СИСТЕМИ»  
денної форми навчання

Частина 2

Відповідальний за випуск Давиденко М.Г.

Редактор Решетилова В.В.

---

Підписано до друку 25.10.10 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія  
залізничного транспорту

61050, Харків - 50, майдан Фейєрбаха, 7

Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

**Українська державна академія залізничного транспорту**

**Кафедра електротехніки та електричних машин**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання лабораторних робіт**

**з дисципліни**

**«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ»**

**для студентів спеціальності**

**«СПЕЦІАЛІЗОВАНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ»**

**денної форми навчання**

**Частина 2**

**Харків 2012**

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Електротехніка і електричні машини” 14.09.2010 р., протокол № 2.

Склали:

доценти М.Г.Давиденко,

О.М. Ананьєва

Рецензент:

проф. Г.І. Загарій

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОБОТА 4. Дослідження послідовного коливального контуру	6
РОБОТА 5. Дослідження електричного кола із взаємною індуктивністю	23
РОБОТА 6. Дослідження з'єднання «зіркою» споживачів трифазного струму	29
Список літератури	37

## ВСТУП

Кожен студент повинен протягом поточного семестру виконати всі лабораторні роботи за планом, складеним кафедрою на цей семестр. Інші обов'язки та права студентів та викладачів щодо виконання циклу лабораторних робіт є такими, що встановлені Положенням щодо організації підготовки, проведення та захисту лабораторних робіт в УкрДАЗТ [1].

Студенти повинні попередньо готуватися до кожного заняття, яке має відбутися за планом робіт: вивчити відповідні розділи теоретичного курсу за конспектом лекцій (або) навчальною літературою, виконати необхідні попередні розрахунки, а також акуратно підготувати бланк звіту за правилами, наведеними в наступному підрозділі цих методичних вказівок.

**Увага! Необхідні для виконання попередніх розрахунків величини постійних опорів та ЕРС джерел постійної напруги наведені в таблиці варіантів, розташованій у лабораторії натурального експерименту.**

Для безпечного виконання робіт у лабораторії, а також для уникнення псування лабораторних приладів і обладнання всі особи, які працюють у цій лабораторії, повинні виконувати правила, перелічені нижче.

1 При першому відвідуванні лабораторії студенти повинні ретельно ознайомитися з правилами техніки безпеки та внутрішнього розпорядку, які встановлені в лабораторіях кафедри; на підтвердження цієї ознайомленості студенти повинні поставити свій підпис у відповідній колонці лабораторного журналу.

2 Допуск студентів у лабораторію дозволяється тільки в години, вказані в розкладі занять. Студенти, які пропустили заняття з поважних причин, виконують роботи у спеціально виділений кафедрою додатковий час.

3 Підготовленість студента до виконання чергової лабораторної роботи перевіряє викладач у процесі допускового

контролю. Студенти, знання яких виявилися незадовільними, не отримують допуску до виконання чергової лабораторної роботи.

4 Для роботи в лабораторії група поділяється на бригади, що складаються з двох-чотирьох студентів. При цьому робота виконується на своїх робочих місцях, з дотриманням належного порядку та тиші.

5 Слід працювати згідно з вивченими правилами техніки безпеки, а також згідно з правилами, викладеними в п.п.6-9.

6 При складанні електричних кіл необхідно пильнувати за тим, щоб вимірювальні прилади, що використовуються, та інші елементи вимірювальної установки відповідали робочим величинам струмів, напруг та потужностей.

7 Перед початком роботи стрілки електровимірювальних приладів повинні бути встановлені на нуль, а прилади з кількома межами вимірювань, крім того, повинні бути ввімкнені на максимальну межу вимірювань.

8 Перш ніж до складеної вимірювальної установки буде підключене джерело живлення, необхідно показати її викладачеві для перевірки.

9 Якщо за умовами роботи треба змінити досліджуване коло, то це слід робити при знятій нарузі, а перед ввімкненням установки її треба знов показати викладачеві для перевірки.

10 Результати вимірювань студенти повинні пред'явити викладачеві, котрий, у випадку достовірності цих результатів, дає дозвіл на закінчення роботи. До отримання такого дозволу розбирати вимірювальну установку не можна.

11 По закінченні лабораторної роботи члени кожної бригади розбирають свою вимірювальну установку, здають одержаний інвентар та приводять у порядок робоче місце.

Звіти з лабораторних робіт слід складати, дотримуючись таких правил:

1 Звіт з лабораторної роботи виконують на аркушах білого паперу формату А4 згідно з вимогами ДСТУ 3.008-95 (зміст та детальні пояснення цих вимог, а також зразки їх виконання наведені у виданому в УкрДАЗТ навчальному посібнику [2]).

2 Текст звіту повинен бути написаний розбірливо та акуратно тільки чорнилами або спеціальною пастою для кулькових ручок.

3 Схеми та графіки виконують тільки з використанням креслярських інструментів.

4 Літерні та графічні позначення повинні відповідати діючим стандартам.

5 Окрім титульного аркуша та мети роботи звіт повинен містити матеріали, які вказані в розділах «Підготовка до роботи» та «Зміст звіту» виконуваної роботи.

**Звертаємо Вашу увагу на те, що звіти, які є копіями вже існуючих звітів з даної роботи, виконаними будь-яким чином, розгляду за суттю та зарахуванню не підлягають.**

## **РОБОТА 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРУ**

### **Мета роботи**

Метою роботи є експериментальне дослідження частотно-виборних властивостей послідовного коливального контуру.

### **4.1 Теоретичні основи роботи**

Системою зв'язку зазвичай користується водночас багато абонентів (тобто осіб, яких обслуговує ця система). Щоб сигнали кожного з них не надходили до інших абонентів і не заважали їм, у будь-якій системі зв'язку здійснене певне відокремлення (розділення) індивідуальних абонентських сигналів. Одним з найпоширеніших способів такого розділення є частотне розділення, при якому кожний з абонентів здійснює передачу та (або) прийом своїх сигналів лише у заздалегідь відведеному для цього діапазоні частот. Добре відомим прикладом є частотне розділення в радіомовленні, при якому кожна радіостанція веде передачу в суворо заданому діапазоні частот. Отже, щоб чути тільки потрібну радіостанцію, слухачеві необхідно мати в підсилювачах свого приймача сигнал лише від неї, а усі інші сигнали – якось відсіяти, тобто відфільтрувати. Для цього в апаратурі зв'язку використовують спеціальні вузли, які мають



властивості частотної виборності, тобто пропускають крізь себе струми тільки заданого діапазону частот, а струми всіх інших частот заглушують. Ці вузли називають частотними електричними фільтрами (частіше – просто електричними фільтрами). Одним з найпростіших, найбільш вживаних і найбільш важливих для техніки зв'язку частотно-виборних кіл є коло, утворене послідовним з'єднанням котушки індуктивності та конденсатора (рисунок 4.1).

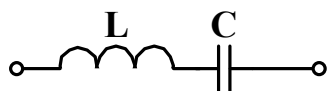


Рисунок 4.1

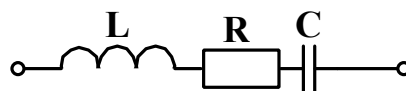


Рисунок 4.2

Його називають **послідовним коливальним контуром**. З урахуванням активного опору дроту, яким намотано котушку і активного опору елементів конструкції конденсатора схема послідовного коливального контуру, яка досить точно відображає властивості реальних електрорадіоелементів, набуває вигляду, як на рисунку 4.2.

Вважатимемо, що наш коливальний контур живиться від реального джерела синусоїдної напруги, миттєве значення якої визначене виразом

$$e_r = \sqrt{2} \cdot E_r \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_E), \quad (4.1)$$

де  $E_r$  – діюче значення цієї ЕРС (назвемо її ЕРС генератора);

$\varphi_E$  – початкова фаза ЕРС;

$f$  – частота, вимірювана в герцах.

Вважатимемо також, що внутрішній опір генератора – суто активний і позначимо його як  $R_r$ . Тоді схема кола, утвореного генератором і послідовним коливальним контуром, набуде вигляду, як на рисунку 4.3. Оскільки це лінійне коло, то при синусоїдному живленні струм  $i$  в ньому та всі його напруги теж синусоїдні; зокрема, синусоїдною є вхідна напруга контуру  $u_{ab}$  та струм  $i$  крізь цей контур. Суто електротехнічні міркування та математичне виведення основних співвідношень між напругами і

струмами послідовного коливального контуру та їх залежність від величин  $L$ ,  $C$  та  $R$  наведені в базовому підручнику [3]. Ми ж зосередимось на співвідношеннях, ближчих до потреб інженера-практика.

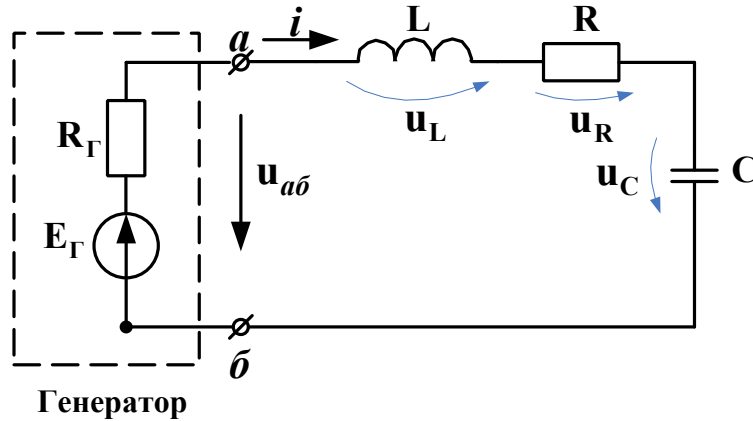


Рисунок 4.3

Перш за все розглянемо те, як поводить себе величина опору послідовного коливального контуру при зміні частоти. Як відомо (див., наприклад, підручники [3, 4]), комплексний опір контуру є таким:

$$\underline{Z}_k = R + j\left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right). \quad (4.2)$$

Цей опір стає суто активним за умови рівності нулю своєї реактивної складової (тобто уявної частини), тобто коли

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C},$$

звідки робимо висновок, що ця рівність має місце на частоті

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (4.3)$$

Цю частоту називають **частотою резонансу**. Сам *режим* роботи послідовного **RLC**-кола, при якому опір цього кола є суто активним, називають **резонансом напруг**.

Абсолютна величина опору (її ще звать повним опором) нашого послідовного коливального контуру (тобто тієї частини кола, яка розташована праворуч від затискачів *a-b* на рисунку 4.3) впливає з формули (4.2) і дорівнює

$$|Z_k| = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2}; \quad (4.4)$$

Графік її залежності від частоти ескізно показаний на рисунку 4.4.

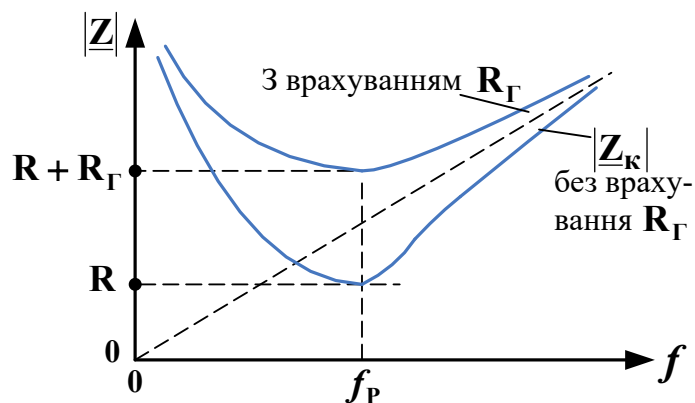


Рисунок 4.4

При описі частотно-виборних властивостей послідовного коливального контуру важливу роль відіграє частотна залежність діючого значення  $I$  струму крізь контур за умови незмінної величини діючого значення ЕРС генератора  $E_r$  на всіх частотах. З послідовної схеми (рисунок 4.3) впливає комплекс діючого значення струму

$$I = \frac{E_r}{R_r + R + j \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)}, \quad (4.5)$$

тобто

$$I = E / Z, \quad (4.6)$$

де опір

$$\underline{Z} = R_r + R + j \left( 2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right) = R_r + \underline{Z}_k \quad (4.7)$$

включає в себе й опір генератора  $R_r$ . Тому для практичних розрахунків виявляється потрібним новий опір, що враховує цей опір генератора:

$$|\underline{Z}| = |R_r + \underline{Z}_k| = \sqrt{(R_r + R)^2 + \left( 2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right)^2}; \quad (4.8)$$

графік його залежності від частоти показаний на рисунку 4.4.

**Запам'ятаймо, що на частоті резонансу опір послідовного коливального контуру сягає свого мінімуму, як це ілюструє рисунок 4.4.**

Як відомо (див., наприклад, підручник [3]), зсув фаз між *напругою* на будь-якому комплексному опорі і *струмом* крізь цей опір – це аргумент цього комплексного опору  $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$ . Тоді з виразу (4.7) впливає така формула для зсуву фаз між ЕРС генератора і струмом контуру:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}}{R_r + R}. \quad (4.9)$$

Коли  $f < f_p$  (див. формулу (4.3)), то опір ємності більший за опір індуктивності і маємо  $\varphi < 0$ ; кажуть, що опір контуру має **ємнісний характер**.

Коли  $f > f_p$ , то, навпаки, опір індуктивності більший за опір ємності і маємо  $\varphi > 0$ ; кажуть, що опір контуру має **індуктивний характер**.

Графік залежності  $\varphi(f)$  наведений на рисунку 4.5.

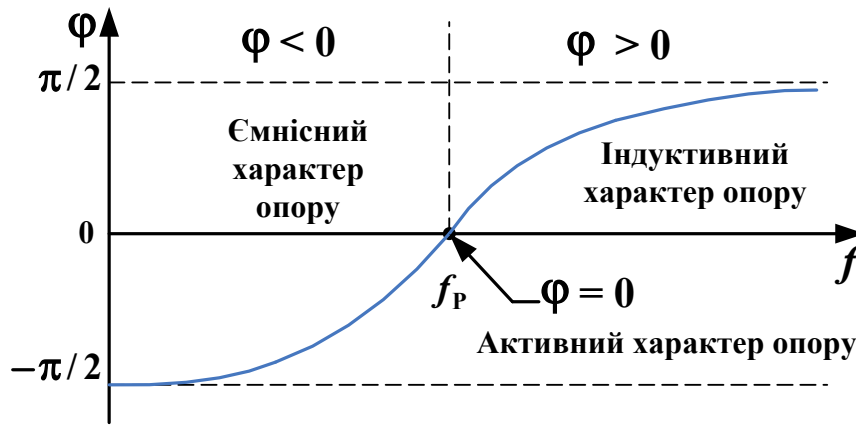


Рисунок 4.5

Як вже було тут відмічено, на частоті резонансу повний опір послідовного коливального контуру сягає свого мінімуму, а відтак, діюче значення струму  $I = |I|$ , згідно з (4.6), при незмінній величині ЕРС сягає свого максимуму. Маємо

$$I(f) = \frac{E}{|Z|} = \frac{E}{\sqrt{(R_{\Gamma} + R)^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}, \quad (4.10)$$

що при  $f = f_p = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$  дає величину струму при резонансі

$$I_p = \frac{E}{R_{\Gamma} + R} = \max. \quad (4.11)$$

Поділивши (4.10) на (4.11), отримаємо так званий нормований струм  $n(f)$ , вираз для якого можна привести до вигляду

$$n(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f}\right)^2}}, \quad (4.12)$$

де  $Q = \sqrt{\frac{L}{C}} / (R_{\Gamma} + R)$  – добротність послідовного коливального контуру, відома Вам з підручника [3] та з курсу лекцій. Графіки частотних залежностей нормованого струму для кількох контурів, що мають одну й ту саму частоту резонансу  $f_p$ ,

але різні добротності, наведені на рисунку 4.6. Бачимо, що із зростанням добротності криві стають більш «загостреними». **Смугою пропускання** послідовного коливального контуру називають діапазон частот, в межах якого струм (не обов'язково нормований) перевищує рівень, який дорівнює  $1/\sqrt{2} \approx 0,707$  від максимальної величини струму. На рисунку 4.6 показано смугу пропускання шириною  $\Delta f_1$  для контуру з добротністю  $Q_1$ ; з цього ж рисунку очевидно, що із зростанням добротності ширина  $\Delta f$  смуги пропускання зменшується. З виразу (4.12) можна отримати корисну формулу

$$\Delta f = f_0 / Q. \quad (4.13)$$

Зауважимо, що для переходу від нормованого струму до звичайного досить перемножити вирази (4.12) та (4.11):

$$I(f) = \frac{E}{R_\Gamma + R} \cdot n(f). \quad (4.14)$$

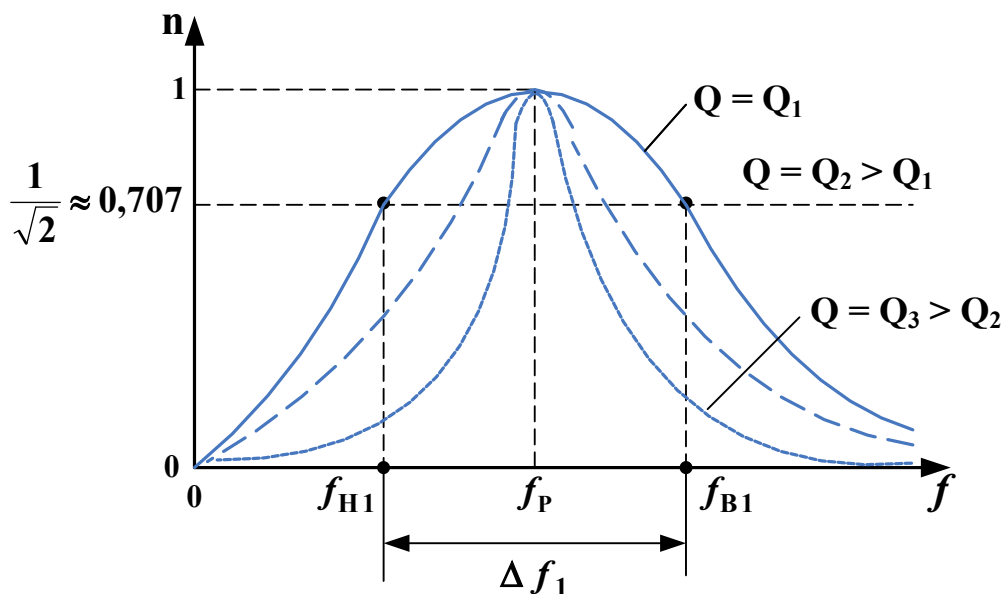


Рисунок 4.6

В реальних пристроях зв'язку для подальшого підсилення та виділення корисного сигналу використовують напругу  $u_C$ , зняту з конденсатора, або напругу  $u_L$  з котушки послідовного коливального контуру (рисунок 4.3). Позначимо діючі значення цих напруг відповідно як  $U_C$  та  $U_L$ . Як Вам відомо з підручника [3], на частоті резонансу  $f_P$  маємо  $U_C = U_L = Q \cdot U$ , тобто обидві ці

напруги в  $Q$  разів перевищують ЕРС джерела сигналу. Тому резонанс у послідовному коливальному контурі називають резонансом напруг. Звичайно в техніці зв'язку  $Q \gg 4$ . Отже, в реальності маємо включення контуру, показане на рисунку 4.7.

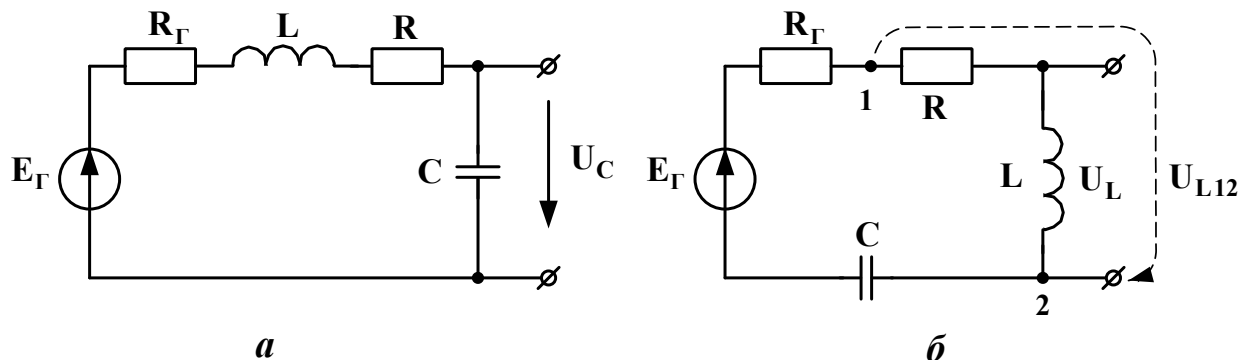


Рисунок 4.7

В класичному підручнику Н.В. Зернова та В.Г. Карпова (див. [2] з переліку додаткової літератури) для цих випадків введені коефіцієнти передачі контуру за напругою, тобто величини, які показують, у скільки разів контур підсилює вхідну ЕРС. Це

$$K_C(f) = \frac{U_C(f)}{E_G} = n(f) \cdot Q \cdot \frac{f_P}{f} \quad (4.15)$$

для рисунка 4.7,а та

$$K_L(f) = \frac{U_L(f)}{E_G} = n(f) \cdot Q \cdot \frac{f}{f_P} \quad (4.16)$$

для рисунка 4.7,б. Зауважимо, що остання формула є наближеною, оскільки зняти напругу з *ідеальної* котушки неможливо; в реальності можна зняти тільки напругу  $U_{L12}$ . Тому формулою (4.16) можна користуватись тільки при великих добротностях ( $Q > 10$ ) і за додаткової умови  $R \ll R_G$ .

Побудовані відповідно до формул (4.15) та (4.16) графіки наведено на рисунку 4.8. Відмітимо, що на частоті резонансу обидва коефіцієнти передачі дорівнюють  $Q$ , у той же час  $K_C(f)$  сягає максимуму на частоті, меншій за  $f_P$ , а  $K_L(f)$  сягає такого ж максимуму на частоті, більшій за  $f_P$ . При великих  $Q$  (десятки-

сотні) частоти обидвох цих максимумів практично дорівнюють  $f_p$ , а величини максимумів практично дорівнюють  $Q$ .

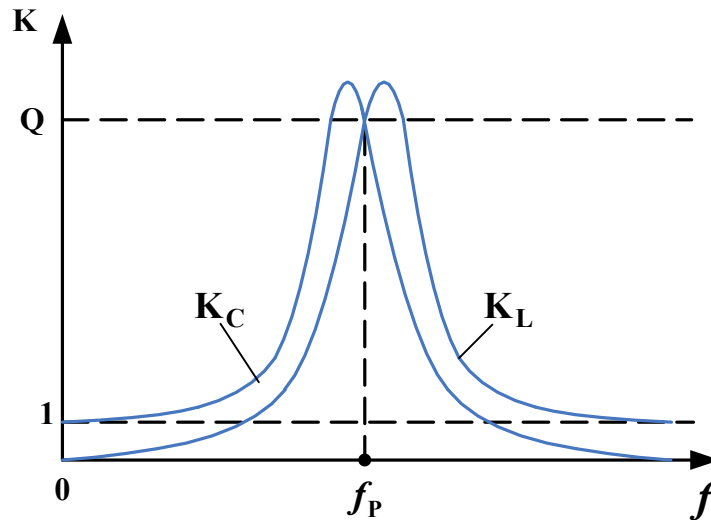


Рисунок 4.8

Спеціально нагадаємо, що в усіх формулах та висновках фігурує добротність послідовного коливального контуру, формулу для якої ми вже навели одразу після формули (4.12):

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R_{\Gamma} + R} \quad (4.17)$$

З неї випливає, що внутрішній опір генератора зменшує добротність, тобто погіршує частотно-виборні властивості послідовного коливального контуру. Ці властивості були б найкращими, якщо б джерело сигналу було ідеальним джерелом напруги.

#### 4.2 Опис вимірювальної установки

Дана робота повністю виконується в лабораторії комп'ютерного моделювання. Для зняття частотної залежності повного опору  $|Z_k(f)|$  послідовного коливального контуру можна було б, звичайно, скористатися вольтметром, амперметром і генератором синусоїдних коливань з керованою частотою. Але в реальних пристроях зв'язку струми крізь коливальні контури дуже малі і треба було б використати дуже чутливий амперметр,



опір обмотки якого близький за величиною до активного опору контуру, і тому суттєво впливає на результати вимірювань. Це не є прийнятним. На щастя, існує вельми зручний прилад – вимірювач частотних характеристик (ВЧХ). Він забезпечує, в залежності від ввімкненого режиму, побудову в заданому частотному діапазоні кривої частотної залежності коефіцієнта підсилення (аналогічно тим, що визначені формулами (4.15) та (4.16)) або частотної залежності фазового зсуву між вихідною та вхідною напругами. Схема вимірювальної установки, складеної з використанням ВЧХ, і призначеної для зняття частотних залежностей повного опору та зсуву фаз  $\varphi$  послідовного коливального контуру, наведена на рисунку 4.9 (величини параметрів елементів беремо з таблиці варіантів, наведеної далі в тексті).

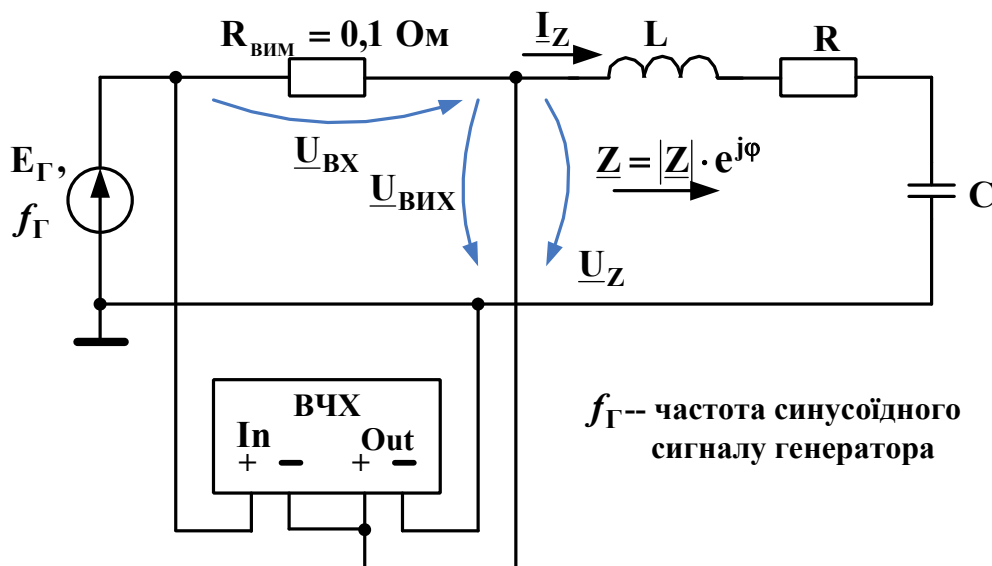


Рисунок 4.9 – Установка для зняття залежності  $Z_k(f)$

Коли ВЧХ працює в режимі «*Magnitude*», він виводить на свій екран графік залежності

$$p(f) = 20 \lg \frac{U_{\text{ВІХ}}(f)}{U_{\text{ВХ}}(f)}. \quad (4.18)$$

Оскільки в схемі з рисунка 4.9 маємо  $U_{\text{ВІХ}}(f) = I_Z(f) \cdot |Z_k(f)|$  та  $U_{\text{ВХ}}(f) = I_Z(f) \cdot R_{\text{ВМ}}$ , то

$$p(f) = 20 \lg \frac{I_Z(f) \cdot |Z_K(f)|}{I_Z(f) \cdot R_{\text{вим}}} = 20 \lg \frac{|Z_K(f)|}{R_{\text{вим}}} = 20 \lg |Z_K(f)| - 20 \lg R_{\text{вим}}. \quad (4.19)$$

Опір  $R_{\text{вим}}$  – це так званий вимірювальний опір; його величина повинна бути набагато меншою, ніж величина  $R$ , щоб не впливати суттєво на добротність контуру. В нашій установці  $R_{\text{вим}} = 0,1 \text{ Ом}$ . Підставивши це в (4.19), отримаємо

$$p(f) = 20 \lg |Z_K(f)| + 20,$$

звідки повний опір в омах обчислюємо як

$$|Z_K(f)| = 10^{0,05p(f)-1}. \quad (4.20)$$

Коли ВЧХ працює в режимі «*Phase*», він виводить на свій екран графік частотної залежності зсуву фаз між вихідною та вхідною напругами

$$\varphi(f) = \varphi_{U_{\text{вих}}}(f) - \varphi_{U_{\text{вх}}}(f). \quad (4.21)$$

Оскільки  $U_{\text{вих}}$  – це напруга  $U_Z$  на опорі  $Z$  контуру, а  $U_{\text{вх}}$  – це напруга на постійному активному опорі  $R_{\text{вим}}$  (яка збігається за фазою із струмом  $I_Z$ , що протікає крізь контур), то з (4.21) маємо

$$\varphi(f) = \varphi_{U_Z}(f) - \varphi_{I_Z}(f). \quad (4.22)$$

Тобто  $\varphi(f)$  і є зсувом фаз між напругою на контурі та струмом крізь нього.

Для побудови кривої частотної залежності струму  $I$  крізь послідовний коливальний контур можна було б просто скористатися законом Ома  $I(f) = E/|Z(f)|$ , де  $|Z(f)|$  ми тільки що розрахували за формулою (4.20), а ЕРС  $E$  – будь-яка постійна величина. Однак цікавіше не будувати  $I(f)$  по точках, а одразу вивести цю криву на екран і миттєво побачити, як впливають на неї зміни параметрів кола. Для цього слід скласти вимірювальну установку за схемою, наведеною на рисунку 4.10. Слід одразу перевести ВЧХ в режим «*Magnitude*». В цьому режимі він виведе на свій екран графік залежності, заданої формулою (4.18). Однак

тепер в нас  $U_{\text{вх}}(f) = E_{\Gamma} = \text{const}$ , а  $U_{\text{вих}}(f) = I_Z(f) \cdot R_{\text{вим}}$ , тому графік на екрані відтворюватиме таку залежність:

$$p(f) = 20 \lg \frac{I_Z(f) \cdot R_{\text{вим}}}{E_{\Gamma}} = 20 \lg I_Z(f) + 20 \lg \frac{R_{\text{вим}}}{E_{\Gamma}}.$$

Неважко довести, що звідси впливає така формула для струму:

$$I_Z(f) = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\text{вим}}} \cdot 10^{0,05p(f)}. \quad (4.23)$$

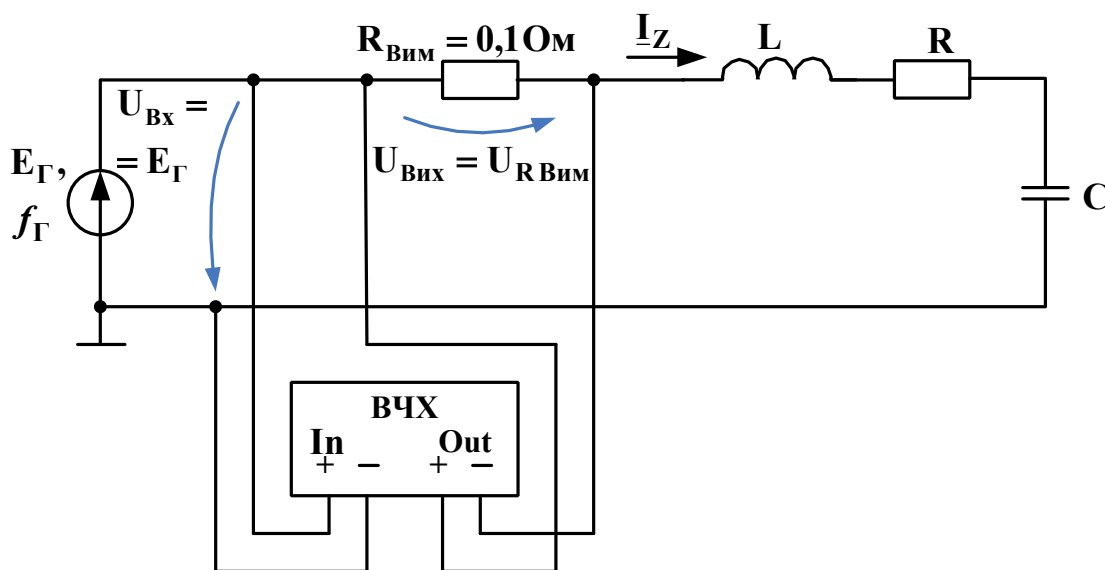


Рисунок 4.10 – Установка для зняття залежності  $I(f)$

Оскільки  $10^{0,05 p(f)}$  – монотонна функція від  $p(f)$ , то графік  $p(f)$  однозначно відображає поведінку струму.

Для побудови частотної залежності коефіцієнта підсилення контуру  $K_c(f)$  при знятті вихідної напруги з конденсатора слід скласти вимірвальну установку за схемою, наведеною на рисунку 4.11, при цьому ВЧХ треба перевести в режим «Magnitude».

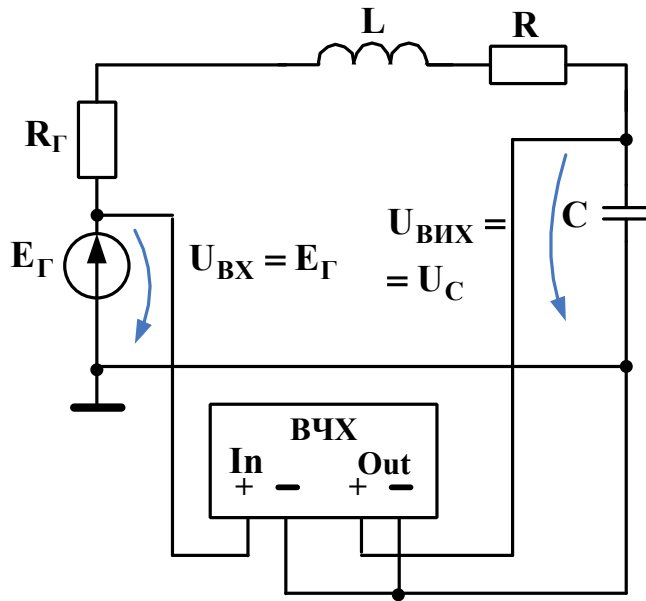


Рисунок 4.11 – Установка для зняття залежності  $K_C(f)$

Ви, мабуть, вже помітили, що таку установку неможливо скласти при реальних вимірюваннях, оскільки неможливо всередині генератора розділити  $R_G$  та  $E_G$ . Однак така схема повністю відповідає теоретично встановленим зв'язкам між напругою, струмом та опорами і дозволяє наочно побачити, як контур підсилює вхідну ЕРС. А ця ЕРС — вже реальна річ, це, наприклад, ЕРС антени, яку можна реально заміряти на розімкнених затискачах антени (тобто в режимі холостого ходу). Графік на екрані відтворюватиме таку залежність:

$$p_C(f) = 20 \lg \frac{U_C(f)}{E_G} = 20 \lg K_C(f). \quad (4.24)$$

Звідси маємо

$$K_C(f) = 10^{0,05 p_C(f)}. \quad (4.25)$$

Зауважимо, що на практиці віддають перевагу не графіку  $K_C(f)$ , оскільки ця величина змінюється в дуже великому діапазоні (сотні або тисячі разів), а компактному графіку величин  $p_C(f)$ . Одиницею вимірювання цих логарифмічних величин є децибел (дБ).

### 4.3 Підготовка до роботи

4.3.1 Вивчіть теоретичні відомості щодо послідовного коливального контуру, використовуючи, як мінімум, основні підручники [3,4]; підрозділ 4.1 даних методичних вказівок та опис вимірювальної установки. Корисно також ознайомитися з відповідними підрозділами додаткової літератури.

4.3.2 Користуючись даними свого номера стенда, взятими з таблиці 4.1 варіантів вихідних даних до цієї роботи, обчислити величину резонансної частоти  $f_{рез}$ , досліджуваного послідовного коливального контуру, а також два значення добротності  $Q$  відповідно до двох числових значень опору  $R$  контуру (рисунки 4.9, 4.10). Занести вихідні дані та обчислені величини  $f_{рез}$  та  $Q$  до таблиць 4.2 і 4.3. (Увага! Висота цих таблиць має бути розрахована на 10 рядків вимірювань).

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до роботи 4

Номер варіанта	L, мГн	C, пФ	R, Ом		R <sub>Г</sub> , Ом	
			Рисунки 4.9, 4.10	Рисунки 4.11, 4.12		
1	0,01	157,5	10	1	15	E <sub>Г</sub> =1,55В  f <sub>Г</sub> – довільна порядку 1 МГц
			100		200	
2	0,08	315	20	2	30	
			200		200	
3	0,0133	210	8	1,2	20	
			80		135	
4	0,015	40	15	1	15	
			180		300	
5	0,1	62	20	2	30	
			120		135	
6	0,017	52	20	1,5	30	
			200		300	

Зауваження. Нагадуємо, що  $1 \text{ мГн} = 10^{-9} \text{ Гн}$ , а  $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ .

4.3.3 Користуючись даними для свого номера стенда, взятими з таблиці 4.1, обчислити два значення добротності  $Q$  відповідно до двох числових значень опору  $R_{Г}$  генератора (рисунки 4.11, 4.12). Занести вихідні дані, величину  $f_{рез}$  (обчислену згідно з п.4.3.2) та обчислені величини  $Q$  до таблиць 4.4 і 4.6. (Увага! Висота цих таблиць має бути розрахована на 10 рядків вимірювань).

#### 4.4 Завдання на експеримент

4.4.1 Використовуючи комп'ютерне моделююче середовище (наприклад Multisim) скласти вимірювальну установку відповідно до рисунка 4.9 та своїх вихідних даних.

Таблиця 4.2 – Результати вимірювання  $Z_k(f)$  та  $\varphi(f)$

Варіант №.....; L = .....мГн; C = .....пФ; $f_{рез} = \dots\dots$ МГц											
f, МГц	R = Ом; Q = .....			f, МГц	R = Ом; Q = .....			f, МГц	R = Ом; Q = .....		
	p, дБ	z <sub>к</sub>  , кОм	$\varphi^0$		p, дБ	z <sub>к</sub>  , кОм	$\varphi^0$		p, дБ	z <sub>к</sub>  , кОм	$\varphi^0$

Таблиця 4.3 – Результати вимірювання  $I_z(f)$

Варіант №.....; L = .....мГн; C = .....пФ; $f_{рез} = \dots\dots$ МГц; $E_{г} = \dots\dots$ В								
f, МГц	R = Ом; Q = ....		f, МГц	R = Ом; Q = ....		f, МГц	R = Ом; Q = ....	
	p, дБ	I <sub>z</sub> , мА		p, дБ	I <sub>z</sub> , мА		p, дБ	I <sub>z</sub> , мА

Таблиця 4.4 – Результати вимірювання  $K_C(f)$

Варіант №.....; L = .....мГн; C = .....пФ; $f_{рез} = \dots\dots\dots$ МГц								
f, МГц	R <sub>г</sub> = Ом; Q = ....		f, МГц	R <sub>г</sub> = Ом; Q = ....		f, МГц	R <sub>г</sub> = Ом; Q = ....	
	p, дБ	K <sub>с</sub>		p, дБ	K <sub>с</sub>		p, дБ	K <sub>с</sub>

4.4.2 Перевести ВЧХ в режим «*Magnitude*».

4.4.3 Для десятих частот, які лежать в діапазоні орієнтовно від  $0,5 f_{рез}$  до  $2 f_{рез}$  (точні значення меж цього діапазону встановлюйте за рекомендаціями викладача – керівника роботи) виміряти величини  $p$  для кожного з двох числових значень опору  $R$ . Виміряні величини  $p$  слід заносити у відповідні рядки таблиці 4.2.

4.4.4 Перевести ВЧХ в режимі «*Phase*».

4.4.5 Вибравши діапазон частот та самі частоти аналогічно п. 4.4.3, виміряти величину  $\varphi$  аргументу комплексного опору коливального контуру для кожного з двох числових значень опору  $R$ . Виміряні величини  $\varphi$  слід заносити у відповідні рядки таблиці 4.2

4.4.6 Скласти вимірювальну установку відповідно до рисунка 4.10 та своїх вихідних даних. Перевести ВЧХ в режим «*Magnitude*».

4.4.7 Вибравши діапазон частот та самі частоти аналогічно п. 4.4.3, виміряти величини  $p$  для кожного з двох значень опору  $R$ . Виміряні величини  $p$  слід заносити у відповідні рядки таблиці 4.3.

4.4.8 Скласти вимірювальну установку відповідно до рисунка 4.11 та своїх вихідних даних. Перевести ВЧХ у режим «*Magnitude*».

4.4.9 Вибравши діапазон частот та самі частоти аналогічно п. 4.4.3, виміряти величини  $p$  для кожного з двох значень опору  $R_{\Gamma}$ . Виміряні величини  $p$  слід заносити у відповідні рядки таблиці 4.4.

## 4.5 Опрацювання результатів експериментів

4.5.1 Заповнити обидві колонки  $|z_k|$  таблиці 4.2, виконуючи обчислення за формулою (4.20).

4.5.2 Заповнити обидві колонки  $I_z$  таблиці 4.3, виконуючи обчислення за формулою (4.23).

4.5.3 Заповнити обидві колонки  $K_C$  таблиці 4.4, виконуючи обчислення за формулою (4.25).

4.5.4 Побудувати графіки залежностей  $|z_k|(f)$ ,  $\varphi(f)$ ,  $I_z(f)$ ,  $K_C(f)$  для двох досліджених величин  $Q$  кожен (тобто слід накреслити чотири графіки, кожен з яких складається з двох кривих).

4.5.5 Аналізуючи побудовані графіки, зробити письмові висновки про те, як впливають величини  $R$  та  $R_{\Gamma}$  на «гостроту» (або «крутість» для  $\varphi(f)$ ) цих графіків поблизу частоти  $f_{рез}$ , а також про вплив цих опорів на зсув максимумів або мінімумів цих графіків вздовж осі частот.

## 4.6 Зміст звіту

У звіті з цієї роботи необхідно подати:

- а) мету роботи;
- б) результати підготовки до роботи відповідно до п. 4.3;
- в) результати експериментів відповідно до п. 4.4;
- г) аналіз результатів експериментів і зроблені висновки відповідно до п. 4.6.

### Питання для самоперевірки

Увага! Ці питання призначені виключно для самоконтролю в ході підготовки до поточної лабораторної роботи. Як самі питання, так і відповіді на них не мають бути внесені до звіту з цієї або якоїсь іншої роботи.

Перевірте себе:

- 1) накресліть схему послідовного коливального контуру;
- 2) що таке резонанс напруг?
- 3) які умови досягнення резонансу напруг?
- 4) як обчислити частоту резонансу та добротність послідовного коливального контуру, якщо відомі параметри його елементів ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ )?
- 5) як змінюється з частотою повний опір послідовного коливального контуру?
- 6) як змінюється з частотою струм крізь послідовний коливальний контур при його живленні від ідеального джерела напруги?
- 7) накресліть резонансні криві;
- 8) що таке коефіцієнти підсилення  $K_C(f)$  та  $K_L(f)$ ?
- 9) як, згідно з теорією, добротність контуру впливає на резонансні криві?
- 10) як внутрішній опір джерела сигналу впливає на добротність послідовного коливального контуру?
- 11) для чого призначений вимірювач частотних характеристик (ВЧХ)?
- 12) яке призначення кожного з елементів використаних вимірювальних установок?
- 13) що таке ідеальне та реальне джерела напруги?



14) сформулюйте закон Ома та обидва закони Кірхгофа для кіл синусоїдного струму;

15) що таке вузол, вітка, контур?

16) що таке амплітуда, діюче значення, частота, кутова частота та початкова фаза синусоїдного струму (напруги, ЕРС)?

17) які формули для частотної залежності реактивного опору ідеальної котушки індуктивності? Ідеального конденсатора?

18) що таке комплексний опір послідовного коливального контуру? Активний опір? Реактивний опір?

19) що таке повний опір послідовного коливального контуру?

20) чи залежить від частоти активний опір послідовного коливального контуру?

## **РОБОТА 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ІЗ ВЗАЄМНОЮ ІНДУКТИВНІСТЮ**

### **Мета роботи**

Метою роботи є експериментальне дослідження кола, утвореного послідовним з'єднанням індуктивно-зв'язаних котушок та визначення еквівалентних параметрів цього кола, а також експериментальне отримання залежностей, які характеризують трансформатор без феромагнітного осердя (лінійний трансформатор).

### **5.1 Теоретичні основи роботи**

Якщо зміна в часі струму в одній котушці кола призводить до появи ЕРС в іншій котушці цього кола, то кажуть, що ці дві котушки є індуктивно-зв'язаними, а утворену ЕРС називають ЕРС взаємної індукції.

Частина силових ліній магнітного поля кожної з котушок охоплює й сусідню котушку, тобто є зчепленою з цією котушкою. Тому в першій котушці з'являється додаткове потокозчеплення  $\Psi_{12}$ , викликане полем струму другої котушки, а

в другій котушці з'являється додаткове потокозчеплення  $\Psi_{21}$ , викликане полем струму першої котушки.

Коефіцієнт пропорційності  $M_{12}$  між миттєвим значенням додаткового потокозчеплення  $\Psi_{12}$  першої котушки і миттєвим значенням  $i_2$  струму другої котушки, який це потокозчеплення викликав, називають взаємною індуктивністю першої та другої котушок

$$\Psi_{12} = M_{12} \cdot i_2.$$

Аналогічно дають визначення взаємної індуктивності  $M_{21}$  другої та першої котушок

$$\Psi_{21} = M_{21} \cdot i_1.$$

В лінійних колах  $M_{12} = M_{21} = M$ . У цих колах взаємна індуктивність не залежить від напрямків і величин струмів у котушках, а визначається тільки конфігурацією котушок та їх взаємним розташуванням.

Повне потокозчеплення  $\Psi_1$  першої котушки складається з її власного потокозчеплення  $\Psi_{11}$  та додаткового потокозчеплення  $\Psi_{12}$ . В залежності від напрямків струмів  $i_1$  та  $i_2$  та від взаємного розташування котушок величини  $\Psi_{11}$  і  $\Psi_{12}$  можуть додаватися або відніматися:

$$\Psi_1 = \Psi_{11} \pm \Psi_{12}.$$

Аналогічно для другої котушки маємо

$$\Psi_2 = \Psi_{22} \pm \Psi_{21}.$$

Якщо потокозчеплення додаються, то кажуть, що котушки ввімкнено **узгоджено**, а якщо віднімаються, то кажуть, що котушки ввімкнено **зустрічно**. Взаємний напрямок потокозчеплень визначається напрямком намотки котушок, їх взаємним розташуванням та вибраним додатним напрямком струмів. Наприклад, на рисунку 5.1 котушки ввімкнено послідовно та узгоджено при розташуванні «зірочки» в дужках біля другої котушки, і зустрічно – без дужок. Зірочками позначено так звані **однойменні виводи** котушок. Це такі

виводи, що коли струм однаково спрямований відносно них, то котушки ввімкнено узгоджено, а коли струм спрямований неоднаково, то котушки ввімкнено зустрічно.

Взаємну індуктивність двох котушок визначають за результатами одного з двох таких дослідів:

1 Знаходять вимірюванням або розрахунком  $L_1$  та  $L_2$  котушок. Визначають еквівалентну індуктивність при узгодженому  $L_{E1}$  і зустрічному  $L_{E2}$  ввімкненні котушок:

$$L_{E1} = L_1 + L_2 + 2M, \quad L_{E2} = L_1 + L_2 - 2M.$$

Вираховують  $L_{E1} - L_{E2} = 4M$ , звідки

$$M = \frac{L_{E1} - L_{E2}}{4}.$$

Коефіцієнт зв'язку котушок  $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ .

2 Підключають джерело синусоїдної напруги до одної із котушок і вимірюють струм  $I_1$  через цю котушку та напругу між розімкнутими затискачами другої котушки  $U_{2M}$ , чисельно рівну ЕРС взаємоіндукції  $E_{2M}$ :  $U_{2M} = E_{2M} = I_1 Z_M$ . Тут  $Z_M = X_M = \omega M$  – опір взаємоіндукції двох котушок при частоті  $\omega$ . Звідси

$$M = \frac{U_{2M}}{\omega I_1}.$$

## 5.2 Опис вимірювальної установки

Для виконання вимірювань в лабораторії натурального експерименту слід скласти вимірювальну установку, схему якої наведено на рисунку 5.1, а. До затискачів *a-b* цієї установки підключають досліджувані котушки або нарізно, або з'єднані послідовно (рисунок 5.1, б). В останньому експерименті використовують трансформатор, утворений з цих котушок так, як це показано на рисунку 5.2.

## 5.3 Підготовка до роботи

Вивчіть теоретичний матеріал з електричних кіл із взаємною індуктивністю та з лінійного трансформатора, використовуючи конспект лекцій і відповідні розділи підручників [3,4].

## 5.4 Завдання на експеримент

5.4.1 Скласти базове вимірювальне коло згідно з рисунком 5.1, а.

5.4.2 Підключити до затискачів *a-b* підносну котушку 1 (рисунок 5.1, б.) **Увага!** Опір  $R_{k1}$  – це опір проводу, яким намотано котушку, а не опір окремого резистора!). Після перевірки дослідної установки викладачем встановити вхідну напругу за його вказівкою. Дати котушці прогрітися протягом трьох хвилин. Виміряти величини напруги, струму та потужності, записати їх до рядка 1 таблиці 5.1. Вимкнути живлення.

5.4.3 Підключити до затискачів *a-b* підносну котушку 2 (рисунок 5.1, в. **Увага!** Опір  $R_{k2}$  – це опір проводу, яким намотано котушку, а не опір окремого резистора!). Після перевірки дослідної установки викладачем встановити вхідну напругу за його вказівкою. Дати котушці прогрітися протягом трьох хвилин. Виміряти величини напруги, струму та потужності, записати їх до рядка 2 таблиці 5.1. Вимкнути живлення.

5.4.4 З'єднати котушки 1 та 2 послідовно і узгоджено (рисунок 5.1, г при відповідній орієнтації однойменних затискачів котушок) та підключити це коло до затискачів *a-b* базового вимірювального кола. Після перевірки дослідної установки викладачем встановити вхідну напругу за його вказівкою. Дати котушкам прогрітися протягом трьох хвилин. Виміряти величини напруги, струму та потужності, записати їх до відповідного рядка таблиці 5.2. Вимкнути живлення.

5.4.5 З'єднати котушки 1 та 2 послідовно і зустрічно (рисунок 5.1, г при відповідній орієнтації однойменних затискачів котушок) та підключити це коло до затискачів *a-b* базового вимірювального кола. Після перевірки дослідної установки викладачем встановити вхідну напругу за його вказівкою. Дати котушкам прогрітися протягом трьох хвилин. Виміряти величини напруги, струму та потужності, записати їх до відповідного рядка таблиці 5.2. Вимкнути живлення.

5.4.6 Скласти з індуктивно зв'язаних котушок лінійний трансформатор (рисунок 5.2). Підключити до затискачів *a-b* базового вимірювального кола первинну обмотку трансформатора. До затискачів *c-d* нічого не підключати, встановивши таким чином для трансформатора режим холостого ходу. Після перевірки дослідної установки викладачем

встановити вхідну напругу за його вказівкою. Дати котушкам прогрітися протягом трьох хвилин. Виміряти величини напруг, струму та потужності, записати їх до відповідного рядка таблиці 5.3. Вимкнути живлення.

5.4.7 Підключити до затискачів *c-d* трансформатора активний опір величиною 10 Ом, встановивши таким чином для трансформатора режим роботи під навантаженням. Після перевірки дослідної установки викладачем встановити вхідну напругу за його вказівкою. Дати котушкам прогрітися протягом трьох хвилин. Виміряти величини напруг, струму та потужності, записати їх до відповідного рядка таблиці 5.3. Вимкнути живлення.

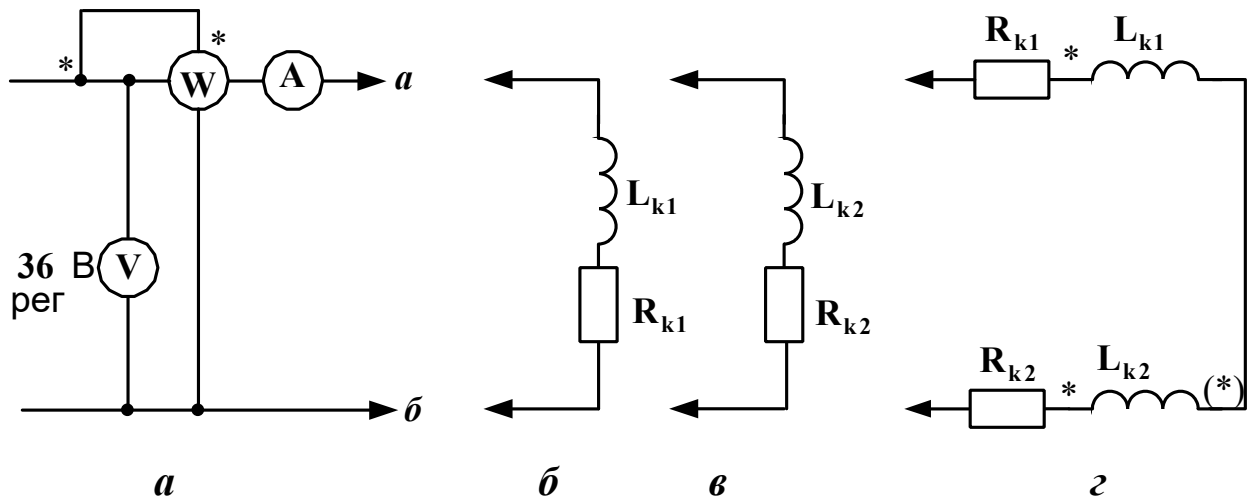


Рисунок 5.1

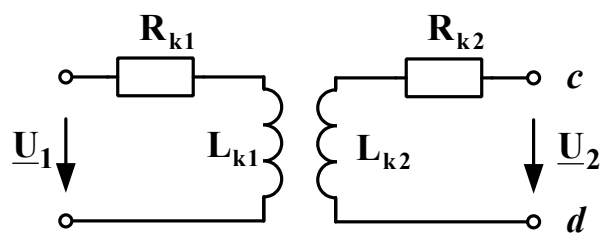


Рисунок 5.2

Таблиця 5.1

Номер катушки	Виміряно			Обчислено				
	U	I	P	Z	cos φ	r	x	L
	В	А	Вт	Ом	-	Ом	Ом	Гн
1								

2								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблиця 5.2

Характер з'єднання котушок	Виміряно			Обчислено						
	U	I	P	Z <sub>о</sub>	r <sub>о</sub>	x <sub>о</sub>	L <sub>о</sub>	M	K	φ
	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	Гн	-	Гр
Послідовне узгоджене										
Послідовне зустрічне										

Таблиця 5.3

Режим роботи трансформатора	Виміряно				Обчислено	
	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}$	$M = \frac{U_2}{\omega I_1}$
	В	В	А	Вт		Гн
Холостий хід						
Робота на активне навантаження						-

## 5.5 Опрацювання результатів експериментів

5.5.1 За дослідними даними (пункти 5.4.2 та 5.4.3 робочого завдання) розрахувати активні, реактивні та повні опори котушок, їх індуктивності. Занести ці результати до таблиці 5.1.

5.5.2 За дослідними даними (пункти 5.4.4 та 5.4.5 робочого завдання) обчислити еквівалентний активний, реактивний та повний опір з'єднаних котушок, їх еквівалентну індуктивність, коефіцієнт взаємодукції та коефіцієнт зв'язку. Занести ці результати до таблиці 5.2.

5.5.3 За дослідними даними (пункти 5.4.6 та 5.4.7 робочого завдання) обчислити величини  $\cos \varphi$  та  $M$ . Занести ці результати до таблиці 5.3.

5.5.4 За даними таблиць 5.1 та 5.2 побудувати в масштабі векторні діаграми струму та напруг *послідовно і узгоджено* ввімкнених індуктивно-зв'язаних котушок та *послідовно і зустрічно* ввімкнених індуктивно-зв'язаних котушок.

## РОБОТА 6. ДОСЛІДЖЕННЯ З'ЄДНАННЯ "ЗІРКОЮ" СПОЖИВАЧІВ ТРИФАЗНОГО СТРУМУ

### Мета роботи

Метою даної роботи є експериментальне визначення напруг і струмів трифазного навантаження, з'єданого "зіркою", при різних режимах роботи та побудування векторних діаграм.

### 6.1 Теоретичні основи 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 дозволяє 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, ввімкнених за схемою "зірка" або "трикутник", і одержує енергію від трифазного генератора. Трифазними приймачами є, наприклад, трифазні асинхронні двигуни, випрямлячі, перетворювачі та ін.

Розрізняють фази генератора, фази приймача і з'єднувальної лінії між ними. Фази прийнято позначати буквами  $A, B, C$ . Об'єднавши у вузол  $\theta$  (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  $\theta'$  (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  $\theta$  генератора з нульовою точкою  $\theta'$  приймача провідником (який називається нульовим або нейтральним) отримаємо чотирипровідне трифазне коло (рисунок 6.1).

Згідно з першим законом Кірхгофа, вектор струму нейтрального провідника є таким:

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

Згідно з другим законом Кірхгофа, зв'язок між векторами фазних 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;

$\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  – вектори фазних напруг.

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

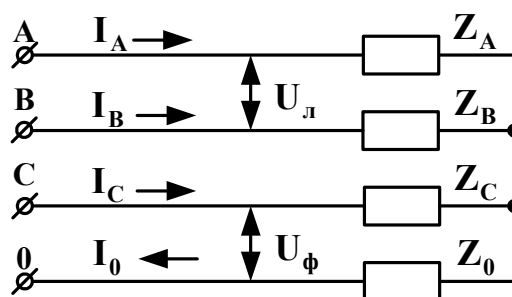


Рисунок 6.1

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, як на рисунку 6.2.



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 6.3.

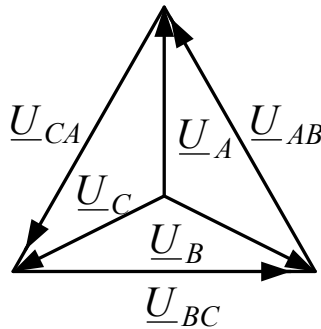


Рисунок 6.2

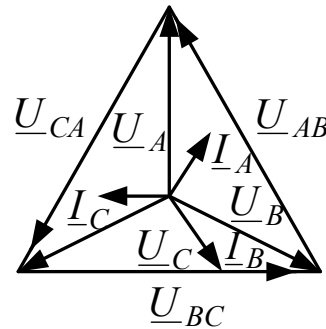


Рисунок 6.3

Тут

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

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  $U_\phi = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$ . Векторну діаграму струмів та напруг у випадку несиметричного **активного** навантаження з нульовим провідником, для якого  $R_A < R_B < R_C$ , подано на рисунку 6.4.

При зміні навантаження, наприклад однієї із фаз, фазні напруги при наявності нейтрального провідника залишаються

незмінними. При цьому змінюється струм в 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 6.5.

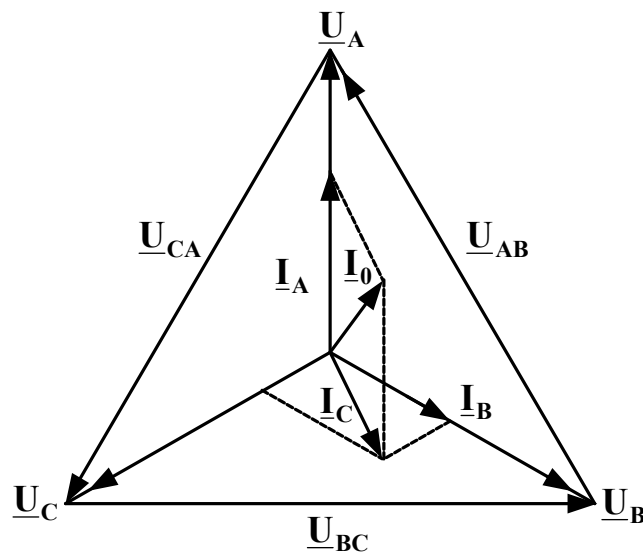


Рисунок 6.4

Як видно з векторної діаграми (рисунок 6.5), при відсутності нейтрального провідника у випадку несиметричного навантаження фазні напруги є різними:  $U_{\phi} \neq \frac{U_{\phi 0}}{\sqrt{3}}$ . Чим більший степінь несиметрії, тим більше фазні напруги джерела будуть відрізнятися від фазних напруг на приймачі, що може привести до аварійних ситуацій. Таким чином, при несиметричному навантаженні нейтральний провідник вкрай необхідний.

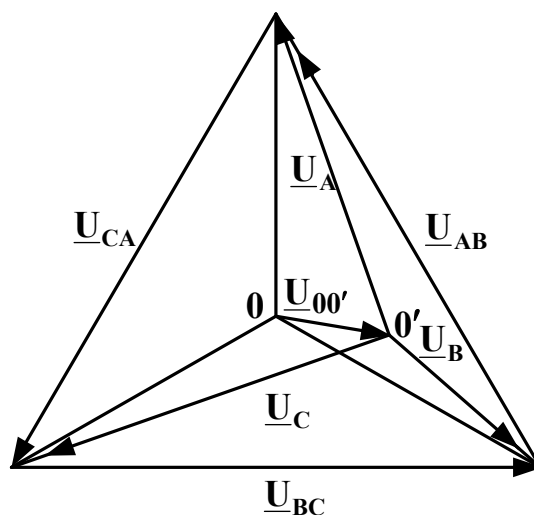


Рисунок 6.5

Рекомендовані літературні джерела: [3,4].

## 6.2 Рекомендації щодо побудови вимірювальної установки та побудування векторних діаграм

6.2.1 В 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.

6.2.2 Заміри напруг виконують одним вольтметром. Необхідно чітко уявляти, що таке фазні та лінійні напруги джерела та навантаження та як їх вимірювати.

6.2.3 Амперметр у нейтральному провіднику повинен бути двоМежовим, межа вимірювання струму в нейтральному провіднику у випадку несиметричного та неоднорідного навантаження кожної фази не повинна перебільшувати 2 А.

6.2.4 Досліджуючи вплив зміни струму в одній з фаз на струм у нейтральному провіднику, необхідно спочатку скласти коло трифазного активного навантаження за схемою, наведеною на рисунку 6.6 (ключ П замкнений). Два з опорів встановлюють однаковими й такими, щоб їх фазні струми склали близько 0,5 А. Третій опір (він є опором досліджуваної фази) встановлюють мінімальним настільки, щоб його фазний струм не перевищував 1 А. В ході досліджень цей опір збільшують приблизно до 100 Ом.

6.2.5 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 в масштабі величинам фазних напруг  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$ , робляться засічки. Точка перетину трьох засічок – точка  $0'$  – нульова точка навантаження для несиметричного режиму без нейтрального провідника. З'єднавши точку  $0'$  з вершинами трикутника  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , отримаємо положення векторів фазних напруг  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$ . Вектор між точками  $0$  джерела та  $0'$  навантаження – величина зміщення нейтралі у масштабі напруги  $\underline{U}_{00'}$ . З точки  $0'$  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.

### 6.3 Робоче завдання

6.3.1 Зібрати електричне коло згідно з рисунком 6.6.

6.3.2 Дослідити коло в таких режимах:

- симетричний з нульовим проводом та без нульового проводу;
- несиметричний з нульовим проводом та без нульового проводу.

6.3.3 Згідно з п.п. 1 - 4 таблиці 6.1, провести вимірювання для усіх перелічених режимів та занести дані у відповідні рядки таблиці 6.1.

6.3.4 Визначити вплив на струм у нульовому проводі зміни навантаження у фазі  $A$  при незмінних навантаженнях фаз  $B$  та  $C$ . Дані вимірювань занести в таблицю 6.2.

6.3.5 Зібрати електричне коло згідно з рисунком 6.7.

6.3.6 Дослідити трифазне коло у симетричному та несиметричному режимах навантаження з нульовим та без нульового проводу згідно з п.п. 5,6 таблиці 6.1.

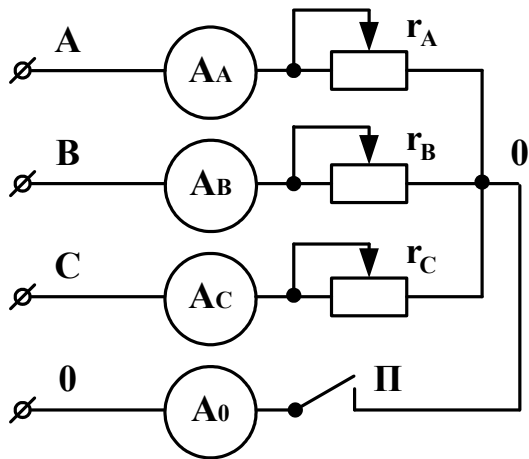


Рисунок 6.6

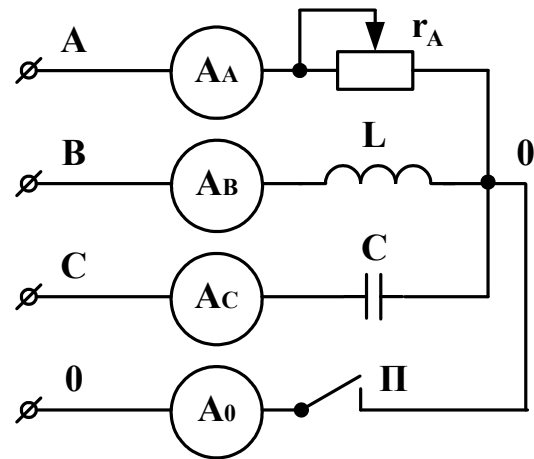


Рисунок 6.7

6.3.7 Поміняти місцями котушку індуктивності та конденсатор, дослідити коло згідно з п.п. 7, 8 таблиці 6.1.

#### 6.4 Опрацювання результатів експериментів

6.4.1 Використовуючи дані вимірювань (таблиця 6.1), побудувати в масштабі векторні діаграми напруг та струмів окремо за даними кожного рядка цієї таблиці.

6.4.2 Згідно з даними таблиці 6.2, побудувати графік залежності струму в нульовому проводі від нерівномірного навантаження, тобто  $I_0 = f(I_A)$ .

6.4.3 Сформулювати загальні висновки щодо роботи.

#### 6.5 Зміст звіту

У звіті з роботи необхідно подати:

- а) мету роботи;
- б) результати експериментів відповідно до п. 6.3;
- в) аналіз результатів експериментів і зроблені висновки

відповідно до п. 6.4.

Таблиця 6.1

№ пп	№ рис.	Характер навантаження	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$
			А	А	А	А	В	В	В	В	В	В
1		Симетричне з нульовим проводом										

2	Рисунк 6.6 Симетричне без нульового проводу																			
3	Рисунк 6.6 Несиметричне з нульовим проводом																			
4	Несиметричне без нульового проводу																			
5	Рисунк 6.7 Несиметричне з нульовим проводом (r,L,C)																			
6	Несиметричне без нульового проводу (r,L,C)																			
7	Несиметричне з нульовим проводом (r, C, L)																			
8	Несиметричне без нульового проводу (r,C, L)																			

Таблиця 6.2

$I_A, A$																				
$I_o, A$																				

## Список літератури

### Основна

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

2 Коновалов Є.В., Козар Л.М. Студентська навчальна звітність. Текстова частина (пояснювальна записка). Загальні

вимоги до побудови, викладення та оформлення. – Харків: УкрДАЗТ, 2004.

3 Соболев Ю.В., Бабаєв М.М., Давиденко М.Г. Теорія електричних і магнітних кіл. – Харків: ХВФ «Транспорт України», 2002.

4 Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высшая школа, 2003.

#### **Додаткова**

1 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2000.

2 Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972.

3 Агасьян М.В., Мартиненко О.Г. Основы электрорадиотехнических кіл. – К.: Вища школа, 1993.

4 Основы теории кіл. Ч.1/ Ю.О.Коваль, Л.В.Гринченко, І.О. Милютченко, О.І.Рибін. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006.