

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електротехніки та електричних машин

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт

з дисципліни

***«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»***

для студентів напряму підготовки

«СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ»

всіх форм навчання

Частина 2

Харків 2016

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри електротехніки та електричних машин 10 лютого 2016 р., протокол № 6

Рекомендуються для студентів напряму підготовки 6.070107 «Системи забезпечення руху поїздів» всіх форм навчання.

Укладачі:

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

Рецензент

доц. О.Є. Зінченко

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6. Експериментальне дослідження явища резонансу напруг.....	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7. Дослідження електричного кола із взаємною індуктивністю.....	14
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8. Дослідження з'єднання «зіркою» споживачів трифазного струму.....	19
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9. Дослідження електричного кола періодичного несинусоїдного струму.....	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10. Дослідження явища ферорезонансу напруг.....	34
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 11. Дослідження перехідних процесів в лінійному електричному колі, що містить активний опір, котушку індуктивності та конденсатор.....	39
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 12. Дослідження коректора амплітудно-частотної характеристики.....	45
Список літератури.....	50

ВСТУП

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

Студенти повинні попередньо готуватися до кожного заняття, яке має відбутися за планом робіт: вивчити відповідні розділи теоретичного курсу за конспектом лекцій і (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 натурного експерименту.

Для безпечного виконання робіт у лабораторії, а також для уникнення псування лабораторних приладів і обладнання всі особи, працюючі в 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 додержанням належного порядку і тиші.

5 Слід працювати за вивченими правилами техніки безпеки, а також за правилами, викладеними в 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 і 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 підімкнено 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, який, у випадку достовірності цих результатів, дає дозвіл на закінчення роботи. До отримання такого дозволу розбирати вимірювальну установку заборонено.

11 По закінченні лабораторної роботи члени кожної бригади розбирають свою вимірювальну установку, здають одержаний інвентар і 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 і детальні пояснення цих вимог, а також зразки їх виконання наведені у виданому в УкрДУЗТ 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, виконані будь-яким чином, розгляду за суттю та зарахуванню не підлягають.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

Експериментальне дослідження явища резонансу напруг

Метою роботи є ознайомлення з явищем резонансу, що виникає в послідовному коливальному контурі, а також дослідна перевірка можливості досягнення резонансу шляхом зміни ємності конденсатора послідовного коливального контуру та експериментальне визначення еквівалентних параметрів контуру.

6.1 Теоретичні основи роботи

У пристроях автоматики та зв'язку дуже часто має місце потреба приймання сигналу, який займає задану вузьку ділянку осі частот і відсіювання всіх інших сигналів як завад. Для цього в апаратурі використовують спеціальні вузли, що мають властивість частотної виборності, тобто пропускають крізь себе струми тільки заданого діапазону частот, а струми всіх інших частот заглушають. Ці вузли називають частотними електричними фільтрами (частіше – просто електричними фільтрами). Одним з найпростіших, найбільш вживаних і найбільш важливих для техніки частотно-виборних кіл є коло, утворене послідовним з'єднанням котушки індуктивності та конденсатора (рисунок 6.1).

Його називають **послідовним коливальним контуром**. З урахуванням активного опору проводу, який намотано на котушку, і активного опору елементів конструкції конденсатора

схема послідовного коливального контуру, яка досить точно відображує властивості реальних електрорадіоелементів, набуває вигляду, наведеного на рисунку 6.2.

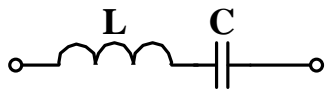


Рисунок 6.1

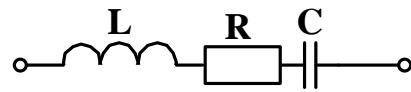


Рисунок 6.2

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

$$e_{\Gamma} = \sqrt{2} \cdot E_{\Gamma} \cdot \sin(2\pi f t + \varphi_E), \quad (6.1)$$

де E_{Γ} – діюче значення цієї ЕРС (назвемо її ЕРС генератора);

φ_E – початкова фаза ЕРС;

f – частота, Гц.

Вважатимемо також, що внутрішній опір генератора – чисто активний і позначимо його як R_{Γ} . Тоді схема кола, утвореного генератором і послідовним коливальним контуром набуде вигляду, наведеного на рисунку 6.3. 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. Перш за все розглянемо те, як поводить себе величина опору послідовного коливального контуру при зміні частоти. Як відомо (див., наприклад, підручник [3]), комплексний опір контуру є таким:

$$\underline{Z}_k = R + j \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right). \quad (6.2)$$

Цей опір стає чисто активним за умови рівності нулю своєї реактивної складової (тобто уявної частини), що має місце при дотриманні рівності

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

Звідси робимо висновок, що ця рівність має місце на частоті

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (6.3)$$

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

Абсолютна величина опору (її ще називають повним опором) нашого послідовного коливального контуру (тобто тієї частини кола, яка розташована праворуч від затискачів **a-b** на рисунку 6.3), впливає з формули (6.2) і дорівнює

$$|Z_k| = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2}; \quad (6.4)$$

графік її залежності від частоти ескізно показаний на рисунку 6.4 суцільною лінією.

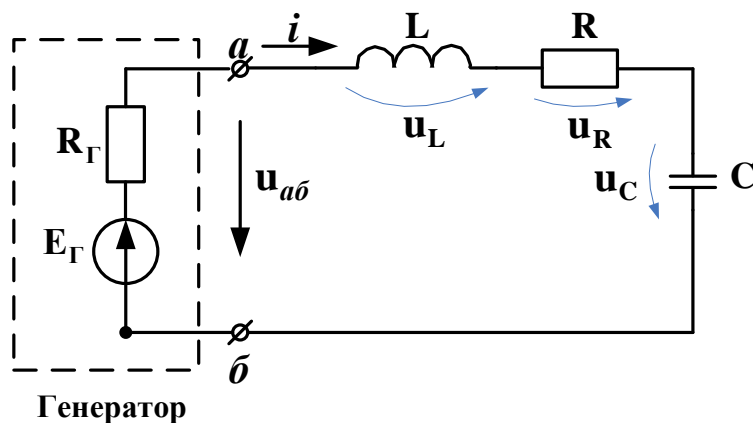


Рисунок 6.3

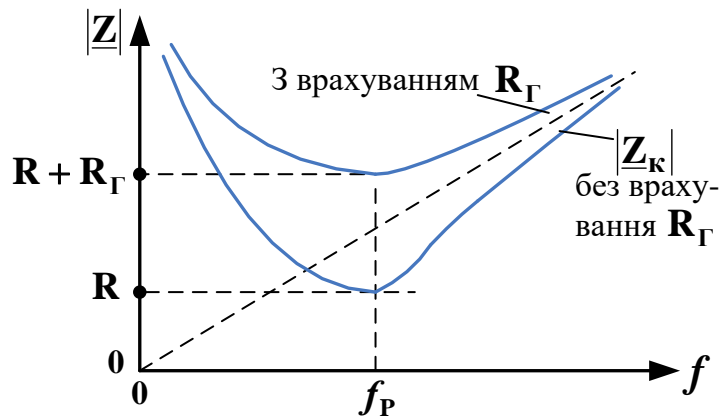


Рисунок 6.4

Однак при описі частотно-виборних властивостей послідовного коливального контуру важливу роль відіграє частотна залежність діючого значення \underline{I} струму крізь контур за умови незмінної величини діючого значення ЕРС генератора $\underline{E}_Г$ на всіх частотах. З послідовної схеми (рисунок 6.3) впливає такий вираз для комплексу діючого значення струму:

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_Г}{\mathbf{R}_Г + \mathbf{R} + j \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right)}, \quad (6.5)$$

тобто

$$\underline{I} = \underline{E} / \underline{Z}, \quad (6.6)$$

де опір

$$\underline{Z} = \mathbf{R}_Г + \mathbf{R} + j \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right) = \mathbf{R}_Г + \underline{Z}_к \quad (6.7)$$

включає в себе й опір генератора $\mathbf{R}_Г$. Тому для практичних розрахунків виявляється потрібним новий опір, що враховує цей опір генератора:

$$|\underline{Z}| = |\mathbf{R}_Г + \underline{Z}_к| = \sqrt{(\mathbf{R}_Г + \mathbf{R})^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right)^2}; \quad (6.8)$$

графік його залежності від частоти показано на рисунку 6.4 штриховою лінією.

Запам'ятаймо, що на частоті резонансу опір послідовного коливального контуру сягає свого мінімуму, як це ілюструє рисунок 6.4.

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 (6.7) випливає така формула для зсуву фаз між ЕРС генератора і струмом контуру:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}}{R_r + R}. \quad (6.9)$$

Коли $f < f_p$ (див. формулу (6.3)), 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 $\varphi(f)$ наведено на рисунку 6.5.

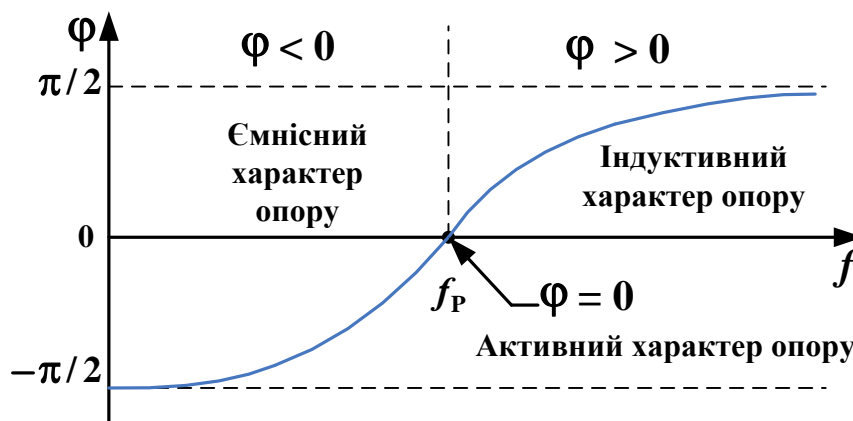


Рисунок 6.5

Як вже було тут зазначено, на частоті резонансу повний опір послідовного коливального контуру сягає свого мінімуму, а відтак

діюче значення струму $I = |I|$, за формулою (6.6), при незмінній величині ЕРС сягає свого максимуму. Маємо

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (6.10)$$

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

$$I_p = \frac{E}{R_{\Gamma} + R} = \max. \quad (6.11)$$

Поділивши формулу (6.10) на формулу (6.11), отримаємо так званий нормований струм $n(f)$, вираз для якого можна привести до вигляду

$$n(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f}\right)^2}} \quad (6.12)$$

де $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ – 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, наведено на рисунку 6.6. Бачимо, що зі зростанням добротності криві стають більш «загостреними». **Смугою пропускання** послідовного коливального контуру називають діапазон частот, у межах якого струм (необов'язково нормований) перевищує рівень, який дорівнює $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ максимальної величини струму. На рисунку 6.6 показано смугу пропускання шириною Δf_1 для контуру з добротністю Q_1 ; з цього ж рисунка видно, що зі зростанням добротності ширина Δf смуги пропускання зменшується. З виразу (6.12) можна отримати корисну формулу

$$\Delta f = f_0 / Q. \quad (6.13)$$

Зауважимо, що для переходу від нормованого струму до звичайного досить перемножити вирази (6.12) та (6.11):

$$I(f) = \frac{E}{R_{\Gamma} + R} \cdot n(f). \quad (6.14)$$

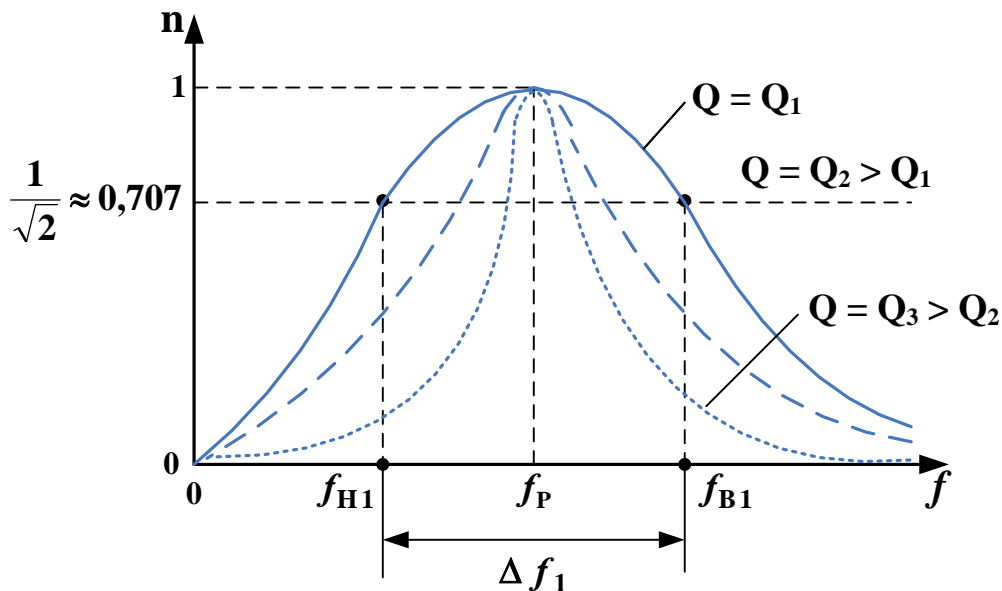


Рисунок 6.6

6.2 Підготовка до роботи

1 Вивчити теоретичний матеріал з резонансу напруг і послідовних коливальних контурів, використовуючи конспект лекцій і відповідні розділи підручника [3].

2 Відповісти письмово на такі питання:

- яке явище в електричному колі називається резонансом напруг і в яких колах воно спостерігається?

- умови досягнення резонансу напруг;

- як з показань приладів визначити момент резонансу?

3 Записати співвідношення для розрахунку величин, які підлягають обчисленню згідно з таблицею 6.1.

4 Ознайомитися з робочим завданням.

6.3 Робоче завдання

1 Скласти досліджуване коло за рисунком 6.7 (коло живиться від джерела синусоїдної напруги "~36 рєг.").

2 Встановити величину вхідної напруги (за вказівкою викладача) і протягом всього досліду зберігати її незмінною. Записати цю величину до відповідної колонки таблиці 6.1.

4 Виміряти напруги, струм і потужність у колі, схему якого зображено на рисунку 6.1, при зміні ємності (15 різних значень) та $U = \text{const}$. Дані занести в розділ «Вимірювання» таблиці 6.1. Зверніть увагу на те, що R_k – це не резистор стенда, а опір проводу, який намотано на котушку.

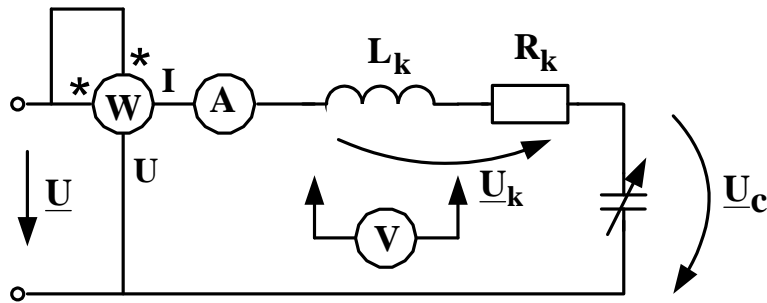


Рисунок 6.7

Таблиця 6.1

Вимірювання ($f = 50$ Гц)						Розрахунок							
C	U	I	P	U _k	U _c	R _k	X _L	X _C	U _A	U _L	L	cos φ	φ
мкФ	В	А	Вт	В	В	Ом	Ом	Ом	В	В	Гн	-	градус
0													
10													
20													
30													
·													
·													
·													
140													

6.4 Аналіз отриманих результатів

1 Обчислити величини, вказані в розділі "Розрахунок" таблиці 6.1, і занести їх у відповідні графи (звертаємо вашу увагу на те, що U_A – це напруга на активному опорі R_k котушки, а U_L – це напруга на її реактивному опорі).

2 За даними таблиці 6.1 побудувати в одній системі координат характеристики $I = f_1(C)$, $U_k = f_2(C)$, $U_c = f_3(C)$, $\cos \varphi = f_4(C)$.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7

Дослідження електричного кола із взаємною індуктивністю

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

7.1 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 Ψ_{12} , викликане полем струму другої котушки, а в другій котушці з'являється додаткове потокозчеплення Ψ_{21} , викликане полем струму першої котушки.

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

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

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

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

У лінійних колах $M_{12} = M_{21} = M$. У цих колах взаємна індуктивність не залежить від напрямків і величин струмів у

катушках, а визначається тільки конфігурацією катушок та їх взаємним розташуванням.

Повне потокозчеплення Ψ_1 першої катушки складається з її власного потокозчеплення Ψ_{11} та додаткового потокозчеплення Ψ_{12} . Залежно від напрямків струмів i_1 та i_2 та від взаємного розташування катушок величини Ψ_{11} і Ψ_{12} можуть додаватися або відніматися:

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

Аналогічно для другої катушки маємо

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

Якщо потокозчеплення додаються, то кажуть, що катушки ввімкнено **узгоджено**, а якщо віднімаються, то кажуть, що катушки ввімкнено **зустрічно**. Взаємний напрямок потокозчеплень визначається напрямком намотки катушок, їх взаємним розташуванням і вибраним позитивним напрямком струмів. Наприклад, на рисунку 7.1 катушки ввімкнено послідовно та узгоджено при розташуванні зірочки в дужках біля другої катушки, і зустрічно – без дужок. Зірочками позначено так звані **однойменні виводи** катушок. Це такі виводи, що коли струм однаково спрямований відносно них, то катушки ввімкнено узгоджено, а коли струм спрямований неоднаково, то катушки ввімкнено зустрічно.

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

1 Знаходять вимірюванням або розрахунком індуктивності L_1 та L_2 катушок. Визначають еквівалентну індуктивність L_{E1} при узгодженому і L_{E2} при зустрічному вмиканні катушок:

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

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

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

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

2 Підключають джерело синусоїдальної напруги до однієї з котушок і вимірюють струм I_1 через цю котушку та напругу між розімкнутими затискачами другої котушки U_{2M} , що чисельно дорівнює 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 ω . Звідси

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

7.2 Опис вимірювальної установки

Для проведення досліджень слід скласти вимірювальну установку, схему якої наведено на рисунку 7.1, а. До затискачів **а-б** цієї установки підключають досліджувані котушки або нарізно, або з'єднані послідовно (рисунок 7.1, б). В останньому експерименті використовують трансформатор, утворений з цих котушок так, як це показано на рисунку 7.2.

7.3 Підготовка до роботи

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

7.4 Завдання на експеримент

1 Скласти базове вимірювальне коло за рисунком 7.1, а.

2 Підключити до затискачів **а-б** підносну котушку 1 (рисунок 7.1, б. **Увага!** Опір $R_{к1}$ – це опір проводу, який 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 7.1. Вимкнути живлення.

3 Підключити до затискачів *a-b* підносну котушку 2 (рисунок 7.1, в. **Увага!** Опір R_{K2} – це опір проводу, який намотано на 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 7.1. Вимкнути живлення.

4 З'єднати котушки 1 та 2 послідовно і узгоджено (рисунок 7.1, г при відповідній орієнтації однойменних затискачів котушок) і 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 7.2. Вимкнути живлення.

5 З'єднати котушки 1 та 2 послідовно і зустрічно (рисунок 7.1, г при відповідній орієнтації однойменних затискачів котушок) і 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 7.2. Вимкнути живлення.

6 Скласти з індуктивно зв'язаних котушок лінійний трансформатор (рисунок 7.2). 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 7.3. Вимкнути живлення.

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 7.3. Вимкнуті живлення.

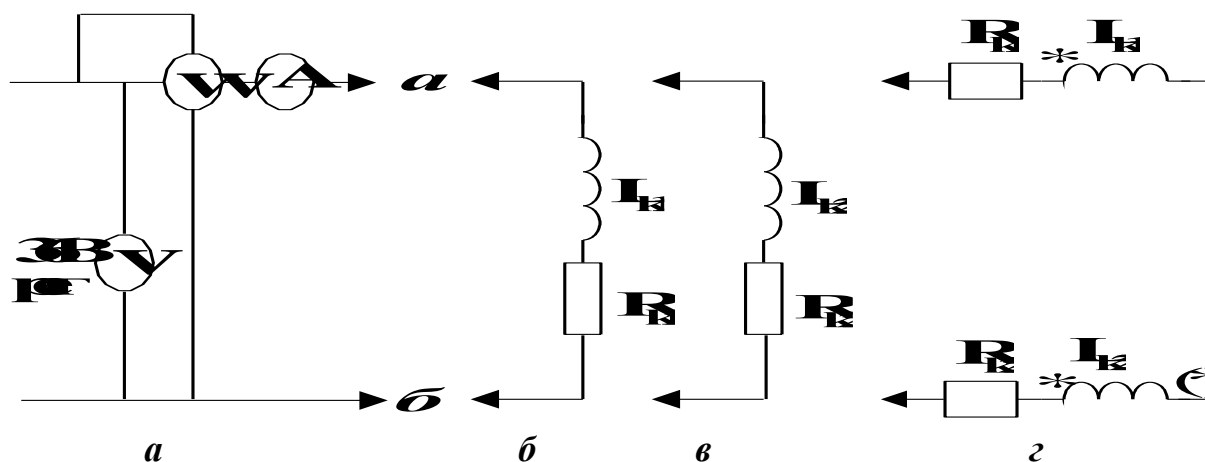


Рисунок 7.1

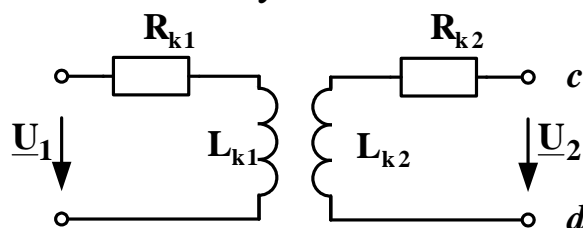


Рисунок 7.2

Таблиця 7.1

Номер катушки	Виміряно			Обчислено				
	U	I	P	Z	cos φ	r	x	L
	В	А	Вт	Ом	-	Ом	Ом	Гн
1								
2								

Таблиця 7.2

Характер з'єднання катушок	Виміряно			Обчислено						
	U	I	P	Z _Е	r _Е	x _Е	L _Е	M	K	φ
	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	Гн	-	Гр
Послідовне узгоджене										
Послідовне зустрічне										

Таблиця 7.3

Режим роботи трансформатора	Виміряно				Обчислено	
	U_1	U_2	I_1	P_1	$\cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}$	$M = \frac{U_2}{\omega I_1}$
	В	В	А	Вт		Гн
Холостий хід						
Робота на активне навантаження						--

7.5 Опрацювання результатів експериментів

1 За дослідними даними (п. 2 та 3 завдання на експеримент) розрахувати активні, реактивні та повні опори котушок, їх індуктивності. Занести ці результати до таблиці 7.1.

2 За дослідними даними (п. 4 та 5 завдання на експеримент) обчислити еквівалентний активний, реактивний і повний опір з'єднаних котушок, їх еквівалентну індуктивність, коефіцієнт взаємоіндукції та коефіцієнт зв'язку. Занести ці результати до таблиці 7.2.

3 За дослідними даними (п. 6 та 7 завдання на експеримент) обчислити величини $\cos\varphi$ та M . Занести ці результати до таблиці 7.3.

4 За даними таблиць 7.1 та 7.2 побудувати в масштабі векторні діаграми струму та напруг *попередньо і узгоджено* ввімкнених індуктивно-зв'язаних котушок і *попередньо і зустрічно* ввімкнених індуктивно-зв'язаних котушок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8

Дослідження з'єднання "зіркою" споживачів трифазного струму

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

8.1 Теоретичні основи роботи

Трифазним електричним колом називають сукупність трьох однофазних кіл змінного струму, у яких діють джерела ЕРС

однакової амплітуди і частоти, зсунуті по фазі одне відносно одного на 120° .

Розрізняють з'єднання трифазного кола "зіркою" і "трикутником", що дозволяє зменшити кількість 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 0 (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 $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$: з'єднується по одному виводу навантажувальних опорів у вузол $0'$ (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 0 генератора з нульовою точкою $0'$ приймача провідником (який називається нульовим або нейтральним) отримаємо чотирпровідне трифазне коло (рисунок 8.1).

За першим законом Кірхгофа, вектор струму нейтрального провідника є таким:

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

За другим законом Кірхгофа, зв'язок між векторами фазних і 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 і лінійних струмів: $I_{\Phi} = I_L$.

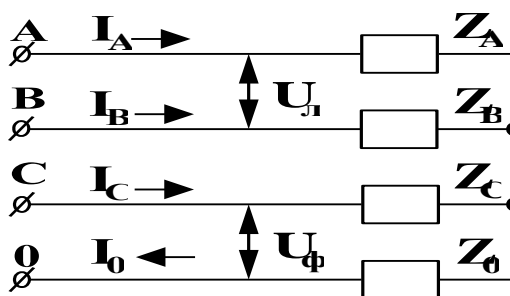


Рисунок 8.1

За наявності нейтрального провідника діючі значення лінійних і фазних напруг зв'язані так: $U_L = \sqrt{3} U_{\Phi}$. Векторна діаграма фазних і лінійних напруг за наявності нейтрального провідника має вигляд, наведений на рисунку 8.2.

Навантаження вважають **симетричним**, якщо має місце рівність **комплексних** опорів усіх фаз: $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$.

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

$$\text{Тут } I_A = I_B = I_C; \quad I_0 = I_A + I_B + I_C = 0; \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C.$$

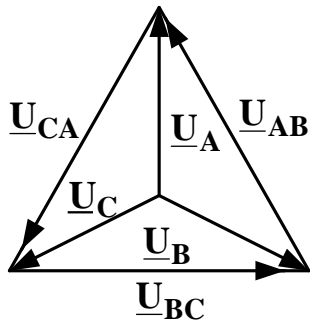


Рисунок 8.2

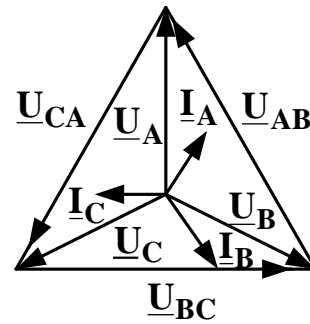


Рисунок 8.3

Відключення нейтрального провідника при *симетричному* навантаженні не призведе до зміни фазних і лінійних струмів і напруг, а також до зміни амплітудних і 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. За наявності нейтрального провідника діюче значення напруги на фазах приймача за умови несиметричного навантаження залишається незмінним та дорівнює $U_{\Phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$.

При зміні навантаження, наприклад однієї з фаз, фазні напруги за 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 8.4.

Як видно з векторної діаграми (рисунок 8.4), за відсутності нейтрального провідника у випадку несиметричного навантаження фазні напруги є різними: $U_{\Phi} \neq \frac{U_L}{\sqrt{3}}$. 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.

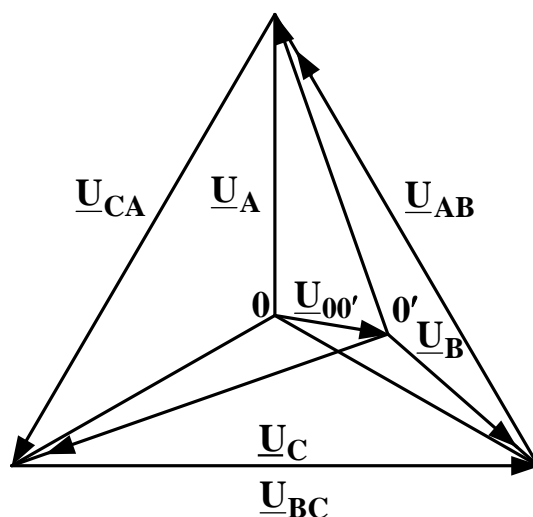


Рисунок 8.4

Рекомендовані літературні джерела: [3, додаткові 4, 6, 7]

8.2 Рекомендації щодо побудови вимірювальної установки 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 Заміри напруг виконують одним вольтметром. Необхідно чітко уявляти, що таке фазні та лінійні напруги джерела та навантаження і як їх вимірювати.

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

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 8.6 (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. Під час досліджень цей опір збільшують приблизно до 100 Ом.

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 А, В, С розхилом циркуля, рівним у 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 А, В, С, 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.

8.3 Робоче завдання

1 Зібрати електричне коло за рисунком 8.5.

2 Дослідити коло в таких режимах:

- симетричний з нульовим проводом і без нульового проводу;

- несиметричний з нульовим проводом і без нульового проводу.

3 За п. 1 – 4 таблиці 8.1 провести вимірювання для всіх перелічених режимів і занести дані у відповідні рядки таблиці 8.1.

4 Визначити вплив на струм у нульовому проводі зміни навантаження у фазі А при незмінних навантаженнях фаз В та С. Дані вимірювань занести в таблицю 8.2.

5 Зібрати електричне коло за рисунком 8.6.

6 Дослідити трифазне коло в симетричному та несиметричному режимах навантаження з нульовим і без нульового проводу за п. 5, 6 таблиці 8.1.

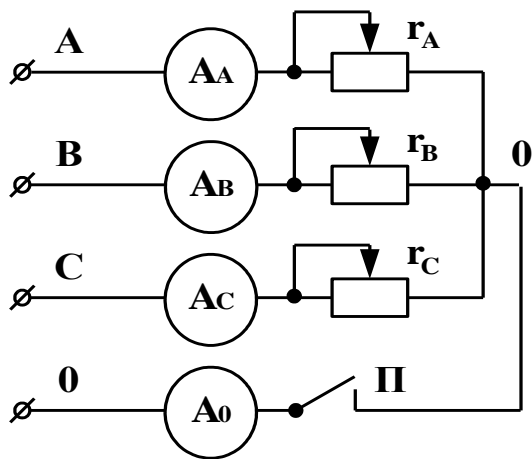


Рисунок 8.5

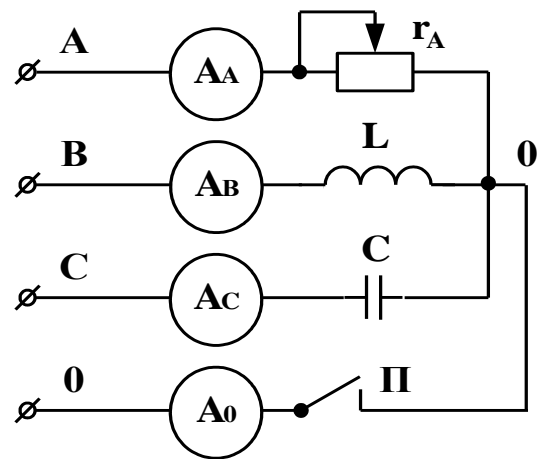


Рисунок 8.6

7 Поміняти місцями котушку індуктивності та конденсатор, дослідити коло за п. 7, 8 таблиці 8.4.

8.4 Опрацювання результатів експериментів

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

2 За даними таблиці 8.2 побудувати графік залежності струму в нульовому проводі від нерівномірного навантаження, тобто $I_0 = f(I_A)$.

3 Сформулювати загальні висновки щодо роботи.

8.5 Зміст звіту

У звіті з роботи необхідно представити:

- а) мету роботи;
- б) результати експериментів відповідно до п. 8.3;
- в) аналіз результатів експериментів і зроблені висновки відповідно до п. 8.4.

Таблиця 8.1

№ пп	Рисунок	Характер навантаження	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_0, A	U_A, B	U_B, B	U_C, B	U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B
1	Рисунок 8.5	Симетричне з нульовим проводом										
2		Симетричне без нульового проводу										
3		Несиметричне з нульовим проводом										
4		Несиметричне без нульового проводу										
5	Рисунок 8.6	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 8.2

I_A, A												
I_0, A												

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9

Дослідження електричного кола періодичного несинусоїдного струму

Мета роботи:

- отримання періодичної несинусоїдної кривої струму вмиканням в електричне коло дроселя насичення (котушки з феромагнітним осердям);
- дослідження впливу характеру навантаження на форму кривої вихідної напруги.

9.1 Теоретичні основи 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 всі періодичні функції умови Діріхле задовольняють), можна розвинути в ряд Фур'є. При цьому несинусоїдну функцію представляють у вигляді суми синусоїдних функцій, що мають у загальному випадку різну частоту коливань, різні амплітуди та відмінні початкові фази.

У тригонометричній формі ряд Фур'є записується так:

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

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 $f(t)$;

ψ_K – початкова фаза k -ї гармоніки.

Якщо $f(t)$ задана аналітично, то використовують таку формулу для визначення коефіцієнтів ряду Фур'є:

$$A_k e^{j(\psi_k - 90^\circ)} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) e^{-jk\omega_1 t} dt.$$

Але часто $f(t)$ задана у вигляді кривої (осцилограми), яка не має аналітичного запису. У цьому випадку раніше використовували графо-аналітичний метод розрахунку гармонік ряду Фур'є, який базується на заміні визначеного інтеграла сумою з певною кількістю доданків. Нині ж користуються математичними програмними середовищами (наприклад, Mathcad), які містять вбудовані функції розвинення в ряд Фур'є (функції спектрального аналізу).

При розрахунку струмів і напруг при несинусоїдній ЕРС джерела сигналу необхідно розвинути 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 з суми квадратів постійної складової струму і діючих значень окремих гармонік і не залежить від зсувів фаз ψ_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 є сумою алгебраїчною.

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

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

тобто відношення амплітуд струму k -ї і першої гармонік у k разів менше 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 заглушає вищі гармоніки струму, ємність – нижчі. На цих властивостях елементів L та C , як елементів дуальних (з протилежними властивостями), будуються схеми реактивних LC-фільтрів.

Рекомендовані літературні джерела: підручник [3].

9.2 Робоче завдання

- 1 Зібрати електричну схему за рисунком 9.1.
- 2 Після перевірки схеми викладачем встановити рукоятку ЛАТР на “0” і ввімкнути тумблером джерело “~36 В рег.”

3 До резистора r під'єднати вхід осцилографа і настроїти його для спостереження форми вхідної напруги $u_{вх}(t)$ на цьому резисторі.

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

5 При заданому значенні струму крізь дросель під'єднати до затискачів 2 - 2' резистор навантаження r_H . Вхід осцилографа під'єднати до резистора $r_{\text{дод}}$. Зарисувати осцилограму $u_{вх}(t)$, зняту з резистора r , і осцилограму $i(t)$, зняту з резистора $r_{\text{дод}}$. Зарисувати осцилограму напруги $u_{вих}(t)$ на затискачах 2-2'. Змінити значення резистора навантаження r_H і повторити вказані вище дії. Порівняти отримані осцилограми $u_{вх}(t)$ та $i(t)$ для двох значень r_H і зробити висновок про вплив величини резистора навантаження r_H на форму струму крізь цей резистор.

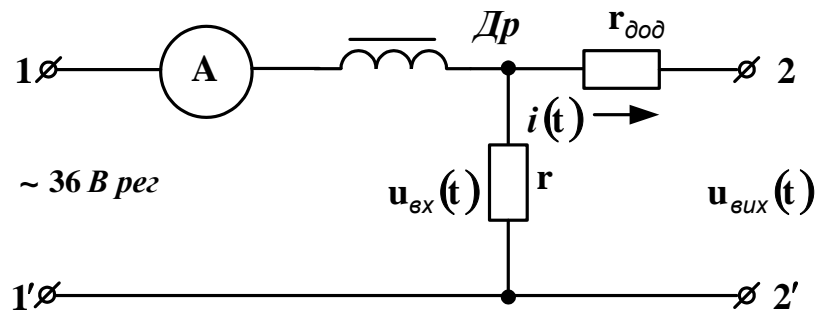


Рисунок 9.1

6 Виконати роботу за п. 5 робочого завдання, 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) і його величини.

9.3 Методичні вказівки до виконання роботи

1 При виконанні роботи керуватися загальними вимогами щодо виконання лабораторних робіт на універсальному лабораторному стенді, дотримуючись правил техніки безпеки.

2 Індуктивність L_H і дросель Dp розташовані в комбінованому підносному блоці.

3 Значення r_H, L_H, C_H для виконання п. 5 та 6 робочого завдання слід отримати у викладача.

4 Як $r, r_{\text{доод}}, r, C$ слід використовувати відповідно резистори $r_{\text{доод}}, R_1, R_2, R_3$ і конденсатор C_1 універсального стенда. Значення елементів $r_{\text{доод}}$ і r відповідно 5 Ом та 7 Ом. Для отримання необхідного значення індуктивності L_H необхідно виконати послідовне узгоджене з'єднання двох лінійних котушок підносного блока (з'єднати затискач K_1 першої котушки та затискач H_2 другої котушки).

9.4 Зміст звіту

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

2 Графіки:

1) напруги $u_{\text{вх}}(t)$, що формує коло, схему якого наведено на рисунку 9.1;

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

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

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10

Дослідження явища ферорезонансу напруг

Мета роботи: експериментальне дослідження явища, що спостерігається при послідовному вмиканні конденсатора і котушки індуктивності зі сталевим осердям.

10.1 Теоретичні основи роботи

Ферорезонанс напруг – це явище, що виникає в електричному колі, складеному з послідовно з'єднаних нелінійної котушки зі сталевим осердям і 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 налаштуванні на резонанс має місце співпадання 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 10.1, замінюють 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.

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 10.1) знаходяться в 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.

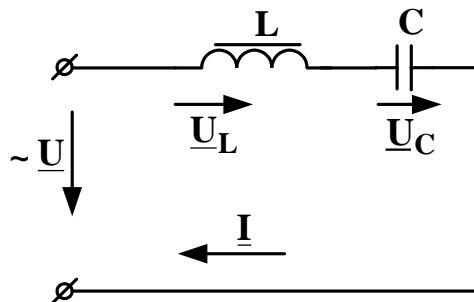


Рисунок 10.1

На рисунку 10.2 зображені:

- ВАХ нелінійної індуктивності $U_L(\mathbf{I})$;

- ВАХ лінійної ємності $U_C(\mathbf{I})$;

- ВАХ кола $U_p(\mathbf{I})$ при послідовному з'єднанні цих елементів, отримана як різниця ординат $U_L(\mathbf{I})$ та $U_C(\mathbf{I})$. Точка перетину ВАХ $U_L(\mathbf{I})$ та $U_C(\mathbf{I})$ (точка А на рисунку 10.2) відповідає ферорезонансу напруг, коли $U_L(\mathbf{I}) = U_C(\mathbf{I})$.

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 $U_p(\mathbf{I})$ не враховує активного опору обмотки, втрат у сталі, наявність вищих гармонік, тобто описує ідеальну ситуацію.

Реальна ВАХ кола має вигляд кривої $U(\mathbf{I})$, значення U якої

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

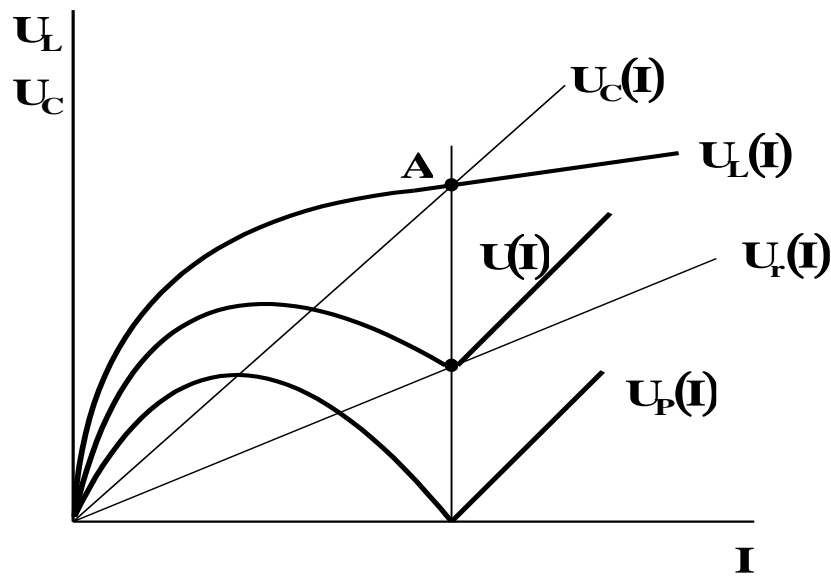


Рисунок 10.2

Зобразимо ВАХ $U(I)$ окремо і проаналізуємо її. Якщо електричне коло живиться від джерела ЕРС \mathcal{E} , починаючи з 0 , плавно збільшується напруга U , то струм I буде плавно збільшуватися від 0 до I_2 , потім стрибкоподібно збільшуватися 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 стрибкоподібно змінюється від I_2 до I_4 .

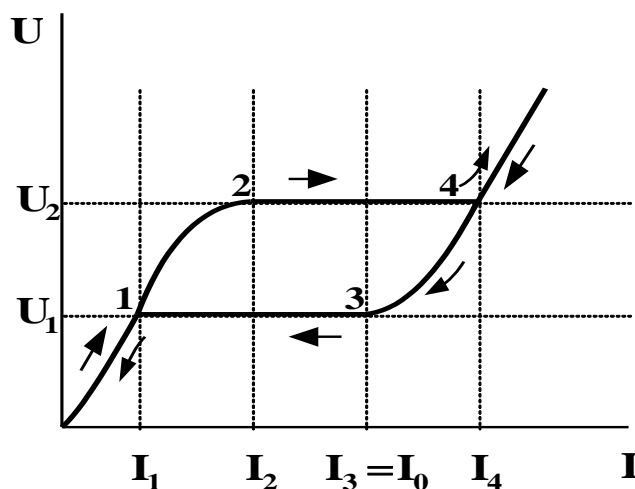


Рисунок 10.3

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

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

Отримання характеристики $U(I)$, зображеної на рисунку 10.2, при всіх значеннях струму можливе тільки при живленні кола від ідеального джерела струму.

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

Рекомендовані літературні джерела: підручник [3].

10.2 Підготовка до роботи

1 Вивчити теоретичний матеріал з даної 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 питання (за завданням викладача), відповіді на решту питань 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 і конденсатора з постійною ємністю?
- чому напруга зворотного стрибка струму відрізняється від напруги прямого стрибка?
- яке практичне використання послідовних ферорезонансних контурів?

10.3 Робоче завдання

1 Зібрати коло для дослідження ферорезонансу напруг. Як котушку індуктивності зі сталевим 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 10.1 та 10.2.

4 Зняти дослідним шляхом ВАХ послідовного ферорезонансного контуру $U = f_3(I)$, заповнити таблицю 10.3.

Таблиця 10.1

$U_L, В$	0									
$I_L, А$	0									

Таблиця 10.2

$U_C, В$	0	
$I_C, А$	0	

Таблиця 10.3

№ п/п	$U, В$	$I, А$	$U_L, В$	$U_C, В$	$P, Вт$	φ
1						
2						
·						
·						
·						
8						

10.4 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 збільшуючи напругу від нуля, а потім зменшуючи її до нуля.

10.5 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 11

Дослідження перехідних процесів у лінійному електричному колі, що містить резистор, котушку індуктивності та конденсатор

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

11.1 Теоретичні основи роботи

Режим роботи електричного кола, при якому розподіл електромагнітної енергії між елементами кола є незмінним (як у колах постійного струму), або цей розподіл змінюється в часі періодичним чином (як у колах синусоїдного та періодичного

несинусоїдного струму), називають стаціонарним або усталеним режимом.

При перемиканнях у колі або при ступінчастих змінах напруг чи струмів джерел енергії в цьому колі починається перерозподіл енергії між його (кола) елементами, скерований на досягнення нового усталеного режиму, відповідного новій конфігурації кола та (або) новим напругам (струмам) джерел. Такі стрибкоподібні зміни конфігурації кола або параметрів його джерел називають **комутаціями**.

Обумовлені переходом від одного усталеного режиму кола до його нового усталеного режиму зміни в часі струмів, напруг і похідних від них величин (наприклад, енергії) називають **перехідними процесами**. Вказані зміни підкоряються певним законам – законам комутації.

За першим законом комутації, струм в ідеальній котушці індуктивності не може змінюватись стрибкоподібно. За другим законом комутації, стрибкоподібно не може змінюватись напруга на ідеальному конденсаторі.

Величини струмів всіх котушок кола та напруг на всіх конденсаторах кола, що мають місце в момент комутації, називають **незалежними початковими умовами** перехідного процесу.

З математичної точки зору, перехідний процес у лінійному колі описується лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням (ДУ). Розв'язок цього рівняння є сумою двох складових. Перша з них – частковий розв'язок цього рівняння. Друга – загальний розв'язок лінійного однорідного ДУ, яке утворюють з першопочаткового неоднорідного ДУ прирівнюванням до нуля всіх його доданків, які не містять шуканого струму (шуканої напруги) і його похідних; зберігають також й постійний член першопочаткового ДУ.

З фізичної точки зору, перехідний процес теж є сумою тих самих двох складових. *Перша* з них має фізичний сенс струму (напруги) нового усталеного режиму. Її можна спостерігати «в чистому вигляді» за допомогою осцилографа, якщо дивитися на ту ділянку осцилограми, у якій всі коливання, пов'язані з переходом від старого до нового усталеного режиму, вже візуально згасли. Цю складову називають **примушеною**

складовою перехідного процесу. Друга з цих складових є різницею перехідного процесу в цілому та його примушеної складової. Ця друга складова саме й описує (у термінах струмів або напруг) процес перерозподілу електромагнітної енергії в колі, започаткований комутацією. Цю складову називають **вільною складовою** перехідного процесу, бо вона є струмом (напругою), що діє в розглядуваній ділянці кола після його відключення від усіх первинних джерел енергії (тобто джерел ЕРС та ідеальних джерел струму). Оскільки в реальному колі обов'язково наявні активні опори, то вільна складова неминуче згасає з плином часу. Дана складова візуально спостерігається на екрані осцилографа як згасаюча «надбудова» над примушеною складовою.

Рекомендовані літературні джерела: підручник [3], додаткові [4, 7].

11.2 Підготовка до роботи

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

2 Вивчити теоретичний матеріал з теми виконуваної роботи.

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

4 Письмово відповісти на питання:

- що таке стала часу τ електричного кола?

- що таке початкові умови кола, у якому відбувається комутація?

- які особливості поведіння котушки індуктивності і конденсатора при нульових і ненульових початкових умовах кола, в якому відбувається комутація;

- чим визначається швидкість згасання коливального процесу при перехідному режимі?

- чим зумовлено виникнення в електричному колі режиму перехідних коливань?

11.3 Робоче завдання

1 При виконанні натурального експерименту ввімкнути осцилограф для його програву. При комп'ютерному моделюванні вивести на монтажне поле екрана прилад **Oscilloscope**.

2 Зібрати досліджуване коло за рисунком 11.1. Параметри елементів можуть бути довільними.

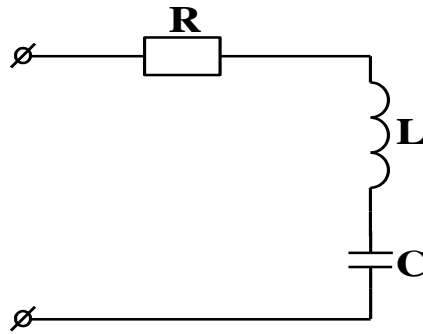


Рисунок 11.1

3 Під'єднати до входу кола генератор прямокутних імпульсів, як це показано на рисунку 11.2. (При використанні комп'ютерного моделюючого середовища, наприклад Multisim, цим генератором є *Function generator* з такими параметрами прямокутного сигналу: частота 100 Гц, шпаруватість (duty cycle) 50 %, амплітуда 10 В.)

4 Взяти за основу наявну величину ємності (орієнтовно 0,1 мкФ) і наявну величину індуктивності (орієнтовно 0,1 Гн), обчислити три величини активного опору **R**, при яких спостерігатимуться відповідно коливальний, граничний аперіодичний і строго аперіодичний перехідні процеси в колі, схему якого наведено на рисунку 11.1.

5 Під'єднати до конденсатора входні шнури осцилографа (при використанні комп'ютерного моделюючого середовища Multisim це будуть проводи, що йдуть від виводів *Channel A* та *Ground terminal* осцилографа). Встановити швидкість розгортки 1 мс/поділлка і вертикальний масштаб 10 В/поділлка.

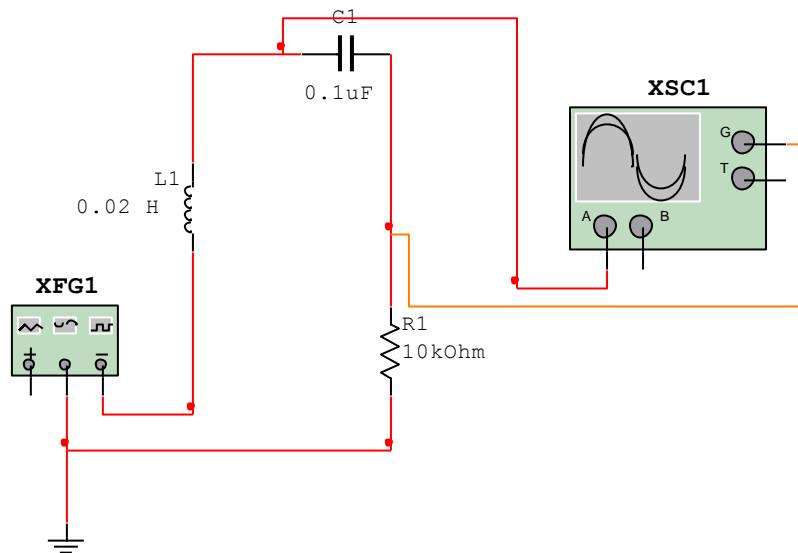


Рисунок 11.2

6 Встановити опір резистора R таким, що має забезпечити коливальний характер перехідного процесу в колі (див. попередні розрахунки з п. 4 робочого завдання). Ввімкнути коло та спостерігати зображення на екрані осцилографа. За необхідності скоригувати величину опору R так, щоб все ж таки отримати коливальний характер перехідного процесу. Після досягнення цієї мети зарисувати осцилограму часової залежності напруги на конденсаторі, не забувши записати швидкість розгортки та вертикальний масштаб, а також величини параметрів елементів кола.

7 Під'єднати вхідні шнури осцилографа до котушки. Спостерегти осцилограму напруги на котушці. За необхідності скоригувати вертикальний масштаб зображення, щоб воно займало по вертикалі майже весь екран. Після цього зарисувати осцилограму часової залежності напруги на котушці, не забувши записати швидкість розгортки та вертикальний масштаб, а також величини параметрів елементів кола.

8 Під'єднати вхідні шнури осцилографа до резистора. Спостерегти осцилограму напруги на резисторі. За необхідності скоригувати вертикальний масштаб зображення, щоб воно займало по вертикалі майже весь екран. Після цього зарисувати осцилограму часової залежності напруги на резисторі, не

забувши записати швидкість розгортки та вертикальний масштаб, а також величини параметрів елементів кола.

9 Повторити дослідження за п. 5 – 8 робочого завдання, встановивши такий опір резистора, що забезпечує граничний аперіодичний характер перехідного процесу (у п. 6 замінити термін “періодичний” на “граничний аперіодичний”).

10 Повторити дослідження згідно з пунктами 11.3.5 - 11.3.8, встановивши такий опір резистора, що забезпечує строго аперіодичний характер перехідного процесу (в п.11.3.6 замінити термін “періодичний” на “строго аперіодичний”).

11 Знов підключити шнури осцилографа до конденсатора і встановити той опір резистора, що забезпечував періодичний характер перехідного процесу. За вказівками викладача, що проводить дане заняття, встановити величину ємності або індуктивності такою, щоб перехідний процес став строго аперіодичним. Зарисувати осцилограму часової залежності напруги на конденсаторі, не забувши записати швидкість розгортки та вертикальний масштаб, а також величини параметрів елементів кола.

12 Завершити роботу і прибрати робочі місця за загальними вказівками до виконання лабораторних робіт.

11.4 Аналіз отриманих результатів і 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.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 12

Дослідження коректора амплітудно-частотної характеристики

Мета роботи: експериментальне визначення частотної залежності власного згасання коректора амплітудно-частотної характеристики, складеного за схемою Т-подібного моста.

12.1 Теоретичні основи роботи

Однією з умов неспотвореної передачі сигналу лінією зв'язку є постійність її власного згасання в робочому діапазоні частот. У той же час відомо, що власне згасання реальних електричних ліній збільшується з підвищенням частоти. Типовим технічним рішенням, що забезпечує достатню для задоволення потреб практики компенсацію виникаючих за вказаною причиною амплітудних спотворень сигналу є каскадне узгоджене підключення до лінії спеціального чотириполюсника – коректора амплітудно-частотної характеристики (КАЧХ). При цьому власне згасання КАЧХ повинно так залежати від частоти, щоб його сума з власним згасанням лінії була близька до постійної величини (в ідеалі – бути рівною їй) в усьому діапазоні частот.

У даній роботі досліджується КАЧХ, складений за схемою Т-подібного моста (рисунок 12.1). Його власне згасання в неперах визначається співвідношенням

$$a_c(f) = \ln \left| 1 + \frac{Z_1(f)}{R} \right|, \quad (12.1)$$

де $Z_1(f)$ – комплексний опір паралельного ланцюжка R_1C_1 . Підставивши у вираз (12.1) вираз для $Z_1(f)$, можна отримати таку формулу для власного згасання:

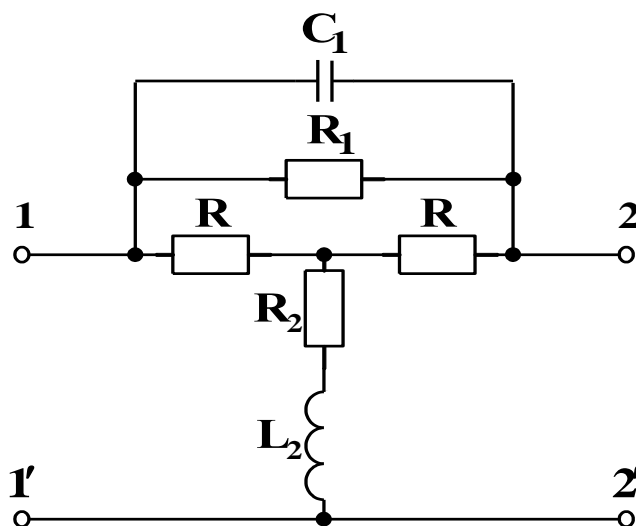


Рисунок 12.1

$$A(f) = 1 + \frac{R_1/R}{1 + (2\pi f R_1 C_1)^2};$$

де

$$B(f) = [A(f) - 1] \cdot 2\pi f R_1 C_1.$$

Якщо двополосники, що входять до складу досліджуваного КАЧХ з опорамі $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ і $Z_2 = R_2 - j\omega C_2$, є взаємно-зворотними, (причому $Z_1^* Z_2 = R$, де R – опір, що входить у вираз (12.1)), то такий КАЧХ має характеристичні опори $Z_H = Z_1 = Z_2 = R$, які не залежать від частоти і які забезпечують його узгоджене підключення до активного частотонезалежного навантаження з опором $Z_H = R$. Умова взаємної зворотності $Z_1^* Z_2 = R$ виконується, якщо елементи схеми підібрані так, що

$$R_1 R_2 = R \quad L_2 / C_1 = R. \quad (12.2)$$

12.2 Вимірювальна установка

Для виконання вимірювань складають коло за схемою, наведеною на рисунку 12.2. Показчик рівня (ПР) підключається у вказані місця по чергово, при цьому вимірюються рівні P_{U1} напруги на затискачах 1 – 1' і P_{U2} напруги на затискачах 2 – 2'. Опір навантаження R_H встановлюється рівним величині R , що визначається співвідношенням (12.2). Оскільки навантаження при цьому виявляється узгодженим, то вираз

$$\frac{P_{U1}}{P_{U2}} = \frac{R}{R_H} \quad (12.3)$$

дає значення власного згасання КАЧХ.

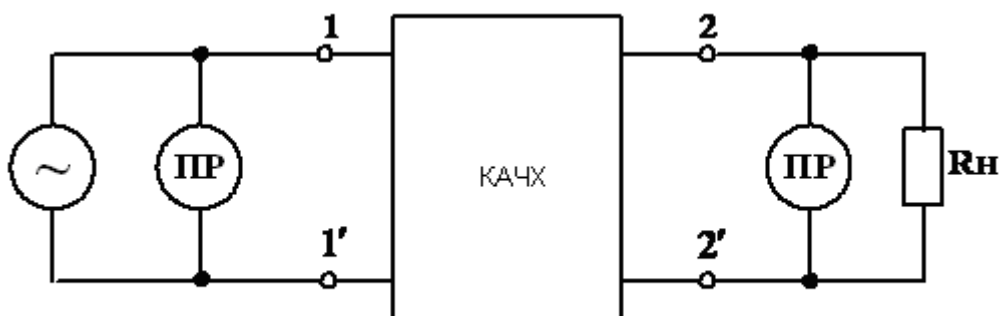


Рисунок 12.2

Значення параметрів елементів КАЧХ задаються викладачем відповідно до таблиці 12.1. Вимірювання виконуються у діапазоні частот 0,3 - 11 кГц.

Таблиця 12.1

Варіант	C_1 , мкФ	R_1 , Ом	L_2 , Гн
1	0,01	3300	0,026
2	0,06	3300	0,037
3	0,0082	3300	0,026
4	0,1	3300	0,054
5	0,01	3300	0,0318
6	0,06	3300	0,003
7	0,02	3300	0,1
8	0,1	3300	0,013

12.3 Робоче завдання

1 Підготувати до роботи генератор і ПР.

2 За величинами C_1 , R_1 , L_2 , відповідними вказаному викладачем номером варіанта, розрахувати величини R і R_2 . Записати у звіт номер варіанта і відповідні йому величини параметрів елементів схеми.

3 Зібрати вимірювальну установку.

4 У діапазоні частот 0,3...11 кГц виміряти величини ρ_{U1} і ρ_{U2} .

5 Розрахувати експериментальну залежність $a_e(f)$ власного згасання досліджуваного КАЧХ.

6 За відомими величинами параметрів елементів досліджуваного КАЧХ розрахувати теоретичну залежність $a_T(f)$ у п'яти точках діапазону 0,3...11 кГц.

7 Побудувати графіки залежностей $a_e(f)$ і $a_T(f)$.

12.4 Зміст звіту

У звіті по роботі необхідно подати:

- 1) схеми вимірювальної установки і досліджуваного КАЧХ;
- 2) розрахункові формули;
- 3) дані вимірювань і результати розрахунків у вигляді таблиці 12.2;
- 4) вказані в п. 12.3 графіки залежностей;
- 5) висновки.

Таблиця 12.2

Номер варіанта: $R_1 = \dots \text{Ом}$; $C_1 = \dots \text{мкФ}$; $R_2 = \dots \text{Ом}$; $L_2 = \dots \text{Гн}$; $R = \dots \text{Ом}$						
f , кГц	ρ_{U1} , Нп	ρ_{U2} , Нп	a_e , Нп	$A(f)$	$B(f)$	a_T , Нп
0,3						
·						
·						
11,0						

12.5 Контрольні питання

- 1 Призначення і галузь застосування КАЧХ.
- 2 Взаємозв'язки між величинами параметрів елементів КАЧХ, виконаного за схемою Т-подібного моста.
- 3 Вихідні дані до розрахунку КАЧХ і порядок його розрахунку.
- 4 Взаємно-зворотні двополюсники. Взаємозв'язок між величинами параметрів їх елементів.
- 5 Чому різниця рівнів P_{U1} і P_{U2} , виміряних за допомогою використаної вимірної установки, дорівнює власному згасанню КАЧХ (формула (12.3))?

12.6 Поради щодо використання літератури

Достатню для підготовки до даної роботи інформацію можна отримати з підручника [3].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1 Положення щодо організації підготовки, проведення та захисту лабораторних робіт в Українській державній академії залізничного транспорту [Текст]. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – 80 с.

2 Козар, Л.М. Текстова частина (пояснювальна записка). Загальні вимоги до побудови, викладення та оформлення [Текст] / Л.М. Козар, Є.В. Коновалов, А.О. Лапко [та ін.]. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – 40 с.

3 Електротехніка та електромеханіка систем залізничної автоматики [Текст] / М.М. Бабаєв, М.Г. Давиденко, Г.І. Загарій [та ін.]. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 608 с.

Додаткова

4 Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2000. – 638 с.

2 Зернов, Н.В. Теория радиотехнических цепей [Текст] / Н.В. Зернов, В.Г. Карпов. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.

3 Агасьян, М.В. Основи електрорадіотехнічних кіл [Текст] / М.В. Агасьян, О.Г. Мартиненко. – К.: Вища школа, 1993. – 486 с.

4 Основи теорії кіл [Текст] / Ю.О. Коваль, Л.В. Гринченко, І.О. Милютченко, О.І. Рибін. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – Ч. 1. – 492 с.