	Система менеджменту якості НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС навчальної дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» назва дисципліни	Шифр документа	СМЯ НАУ НМК 07.01.05 – 01 – 2018
		Стор. ___ з ___	

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Навчально-науковий Аерокосмічний інститут

(назва інституту (факультету))

**КАФЕДРА Автоматизації та енергоменеджменту**

(повна назва кафедри)

**ЛАБОРАТОРНІ ЗАНЯТТЯ**

з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки»

Галузь знань: 14 "Електрична інженерія"

Спеціальність: 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Спеціалізація: Енергетичний менеджмент

(шифр та повна назва напрямку (спеціальності))

Укладач: к.т.н., доцент Тихонов Віктор

Васильович

(науковий ступінь, вчене звання, П.І.Б. викладача)

Матеріали практичних занять розглянути  
 схвалений на засіданні кафедри автоматизації  
та енергоменеджменту

(повна назва кафедри)

Протокол № \_\_\_ від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018р.

Завідувач кафедри Захарченко В.П.

**Лабораторне заняття № 1.1**

**Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ  
(ЗМІШАНЕ ВКЛЮЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ)**

**Мета роботи**

Дослідження електроенергетичних співвідношень електричного кола постійного струму з паралельним та послідовним з'єднанням елементів, експериментальне підтвердження закону Ома.

**Зміст звіту**

Зміст повинен містити.

1. Схему лабораторної установки.
2. Таблицю вимірювань та обчислень.
3. Основні розрахунки.
4. Висновки за результатами досліджень.

**Лабораторне заняття № 1.2**

**Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО  
СТРУМУ (ПЕРЕТВОРЕННЯ «ТРИКУТНИК» - «ЗІРКА»)**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ  
(перетворення «трикутник» - «зірка»)**

**Мета роботи**

Дослідження електроенергетичних співвідношень електричного кола постійного струму із з'єднанням елементів «трикутник» і експериментальне підтвердження еквівалентності переходу від «трикутника» до «зірки».

**Зміст звіту**

Зміст повинен містити.

1. Схему лабораторної установки.
2. Таблицю вимірювань та обчислень.
3. Основні розрахунки.
4. Висновки за результатами досліджень.

### **Лабораторне заняття № 1.3**

**Тема:** ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (ЗАКОНИ КИРХГОФА)

#### **Мета роботи**

Дослідження електроенергетичних співвідношень розгалуженого електричного кола постійного струму, експериментальне підтвердження законів Кирхгофа.

#### **Зміст звіту**

Зміст повинен містити.

1. Схему лабораторної установки.
2. Таблицю вимірювань та обчислень.
3. Основні розрахунки і діаграми.
4. Висновки за результатами досліджень.

### **Лабораторне заняття № 1.4**

**Тема:** ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (МЕТОД ЕКВІВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА)

#### **Мета роботи**

Дослідження розгалуженого електричного ланцюга постійного струму методом еквівалентного генератора.

#### **Зміст звіту**

Зміст повинен містити.

1. Схему лабораторної установки.
2. Таблицю вимірювань та обчислень.
3. Основні розрахунки.
4. Висновки за результатами досліджень.

## **Лабораторне заняття № 1.5**

**Тема:** ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

### **Мета роботи**

Дослідження електричного кола синусоїдального струму, експериментальне визначення фазових співвідношень в колах з реактивними елементами.

## **Лабораторне заняття № 2.1**

**Тема:** ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ В ПОСЛІДОВНОМУ КОНТУРІ

### **Мета роботи**

Дослідження умов виникнень резонансу напруг і основних співвідношень параметрів ланцюга в режимі резонансу

## **Лабораторне заняття № 2.2**

**Тема:** ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ В ПАРАЛЕЛЬНОМУ КОНТУРІ

### **Мета роботи**

Дослідження умов виникнень резонансу струму і основних співвідношень параметрів ланцюга в режимі резонансу

## **Лабораторне заняття № 2.3**

**Тема:** ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З ВЗАЄМНО ІНДУКТИВНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ (ПОСЛІДОВНЕ З'ЄДНАННЯ)

### **Мета роботи**

Дослідження електроенергетичних співвідношень електричного ланцюга синусоїдального струму з котушками при приголосному і стрічному включенні.

## **Лабораторне заняття № 2.4**

**Тема:** ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З ВЗАЄМНО ІНДУКТИВНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ (ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ)

### **Мета роботи.**

Дослідження електроенергетичних співвідношень електричного кола синусоїдного струму із взаємоіндуктивними котушками при узгодженому і

зустрічному включенні, визначення основних енергетичних співвідношень.

### Теоретичні положення

При паралельному включенні індуктивно зв'язаних котушок можливо так само два випадки: узгоджене включення (рис. 1, а) та зустрічне (рис. 1, б).

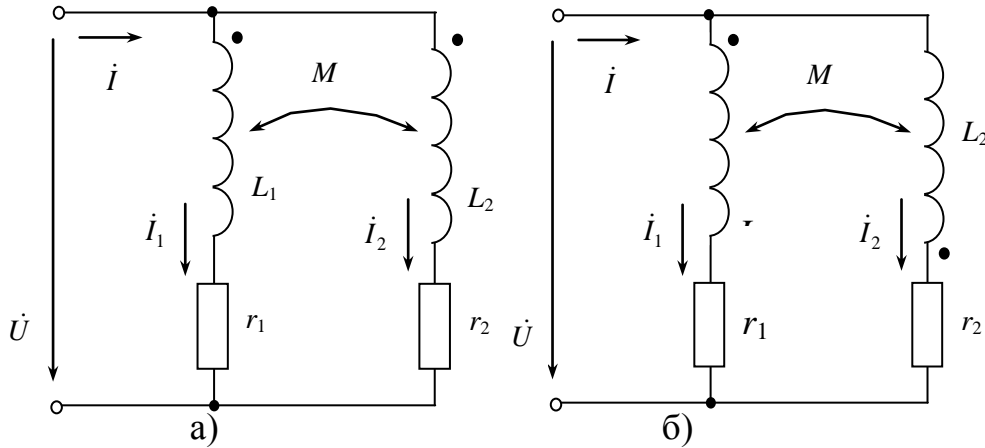


Рис. 1

Для даних схем складемо рівняння за першим і другим законами Кірхгофа

$$I = \dot{i}_1 + \dot{i}_2; \quad \begin{cases} \dot{U} = \dot{i}_1 Z_1 \pm \dot{i}_2 Z_M; \\ \dot{U} = \dot{i}_2 Z_2 \pm \dot{i}_1 Z_M, \end{cases} \quad (1)$$

де  $Z_1 = r_1 + j\omega L_1$ ;  $Z_2 = r_2 + j\omega L_2$ ;  $Z_M = j\omega M$ .

У рівняннях (1) знак «плюс» перед останніми членами рівнянь відповідає узгодженому включенню котушок, а знак «мінус» – зустрічному.

Розв'язуючи систему рівнянь (1), знайдемо комплекси струмів:

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 &= \frac{Z_2 \mp Z_M}{Z_1 \cdot Z_2 - Z_M^2} \dot{U}; \\ \dot{i}_2 &= \frac{Z_1 \mp Z_M}{Z_1 \cdot Z_2 - Z_M^2} \dot{U}. \end{aligned} \quad (2)$$

Верхній з двох знаків перед членами з  $M$  у виразах (2) відповідає узгодженому включенню, нижній – зустрічному.

Таким чином вирази для струмів приймають вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 &= \dot{U} \frac{r_2 + j\omega L_2 \mp j\omega M}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + j\omega L_2) - (j\omega M)^2}; \\ \dot{i}_2 &= \dot{U} \frac{r_1 + j\omega L_1 \mp j\omega M}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + j\omega L_2) - (j\omega M)^2}. \end{aligned}$$

Струм в нерозгалуженій частині кола визначається:

$$\dot{i} = \frac{Z_1 + Z_2 \mp 2Z_M}{Z_1 \cdot Z_2 - Z_M^2} \dot{U}.$$

Тоді вхідний комплексний опір даного кола дорівнює:

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 - Z_M^2}{Z_1 + Z_2 \mp 2Z_M}. \quad (3)$$

При  $Z_M = 0$ , тобто за відсутності індуктивного зв'язку між вітками, вираз (3) приймає знайомий вигляд:

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

При узгодженому включенні:

$$Z_y = r + j\omega L_y = \frac{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + j\omega L_2) - (j\omega M)^2}{r_1 + j\omega L_1 + r_2 + j\omega L_2 - 2j\omega M}.$$

Припустимо, що  $r_1 = r_2 = r = 0$ , тоді:

$$j\omega L_y = \frac{(j\omega)^2 (L_1 L_2 - M^2)}{j\omega (L_1 + L_2 - 2M)}.$$

При узгодженому включенні:

$$L_y = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}.$$

При зустрічному включенні:

$$L_3 = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}.$$

### Порядок виконання роботи

1. Отримати у викладача значення  $E_1$  та зібрати з елементів схему (рис. 2, перемикач 2 і 3 замкнені, а 1 і 4 розімкнені, керування положенням перемикачів здійснюється натисненням клавіші 1), що відповідає узгодженому включенню котушок.

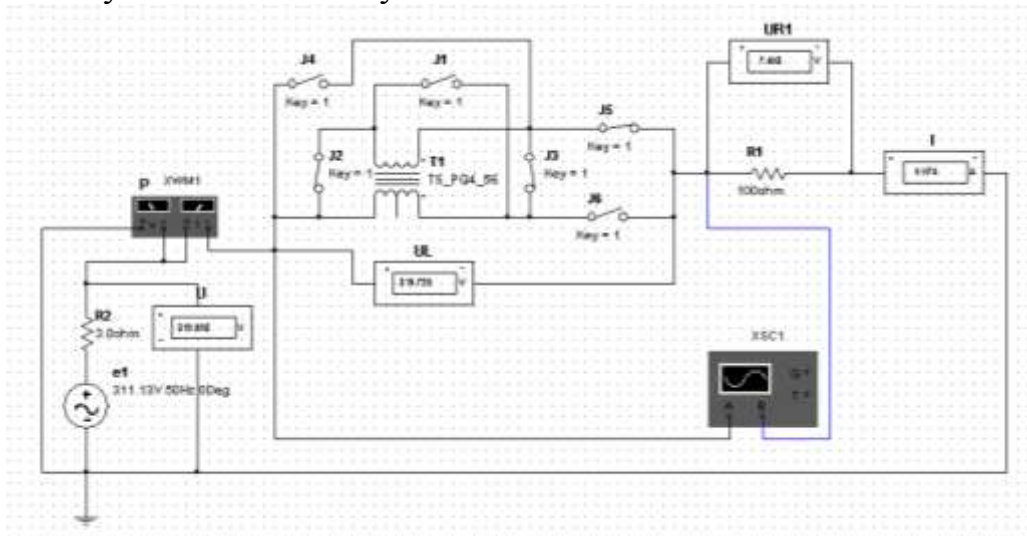


Рис. 2

2. Увімкнути схему і занести в табл. 1 показання приладів і основні параметри елементів схеми при узгодженому включенні. Замалювати з екрану осцилографа часові діаграми.

Таблиця 1

$E,$ $B$	$I,$ $A$	$U_L,$ $B$	$U_{Rl},$ $B$	$P,$ $Вт$	$S_{дж},$ $B \cdot A$	$\cos\varphi$	$\eta$	$Z,$ $Ом$

3. Розрахувати повну потужність джерела, коефіцієнт потужності, ККД і повний комплексний опір. Результати занести в табл. 1.

4. Натиснути клавішу 1. Перемикачі переходять в положення, що відповідає зустрічному включенню котушок, зняти показання і занести їх в табл. 2. Замалювати з осцилографа часові діаграми.

5. Розрахувати повну потужність джерела, коефіцієнт потужності, ККД і повний комплексний опір. Результати занести в табл. 2.

Таблиця 2

$E,$ $B$	$I,$ $A$	$U_L,$ $B$	$U_{Rl},$ $B$	$P,$ $Вт$	$S_{дж},$ $B \cdot A$	$\cos\varphi$	$\eta$	$Z,$ $Ом$

6. Побудувати векторну діаграму кола і трикутник опорів для різних способів з'єднання.

7. Зробити висновки.

Оформити звіт

## Лабораторне заняття № 4.1

### Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧА ЗІРКОЮ

#### Мета роботи

Дослідження трифазного кола змінного струму з'єданого «зіркою» при симетричному і несиметричному навантаженнях.

#### Теоретичні положення

Число проводів в незв'язаній системі можна зменшити, якщо об'єднати три зворотні провідники в один. Для цього з'єднаємо кінці фаз генератора ( $X, Y, Z$ ) в одну точку  $N$ , а кінці фаз приймача ( $x, y, z$ ) – в точку  $n$ . Точки  $N$  і  $n$  називають нейтральними (нульовими) і з'єднують між собою проводом (рис. 1).

Спосіб з'єднання, при якому кінці фаз генератора (або споживачів) з'єднуються в одну точку ( $N, n$ ), а початки виводяться в лінію, називається з'єднанням трифазної системи «зіркою».

Провід, що з'єднує точки  $N$  і  $n$  називається нейтральним. Якщо нейтральний провід заземляється, то він називається нульовим.

Проводи, які з'єднують генератор з приймачем, називаються лінійними.

Струми, що протікають в лінійних проводах, називаються лінійними і позначаються  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  або  $\dot{I}_л$ .

Струми, що протікають у фазах генератора або приймача, називаються фазними і позначаються  $\dot{I}_\phi$ . Струми у фазах приймача позначають  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ .

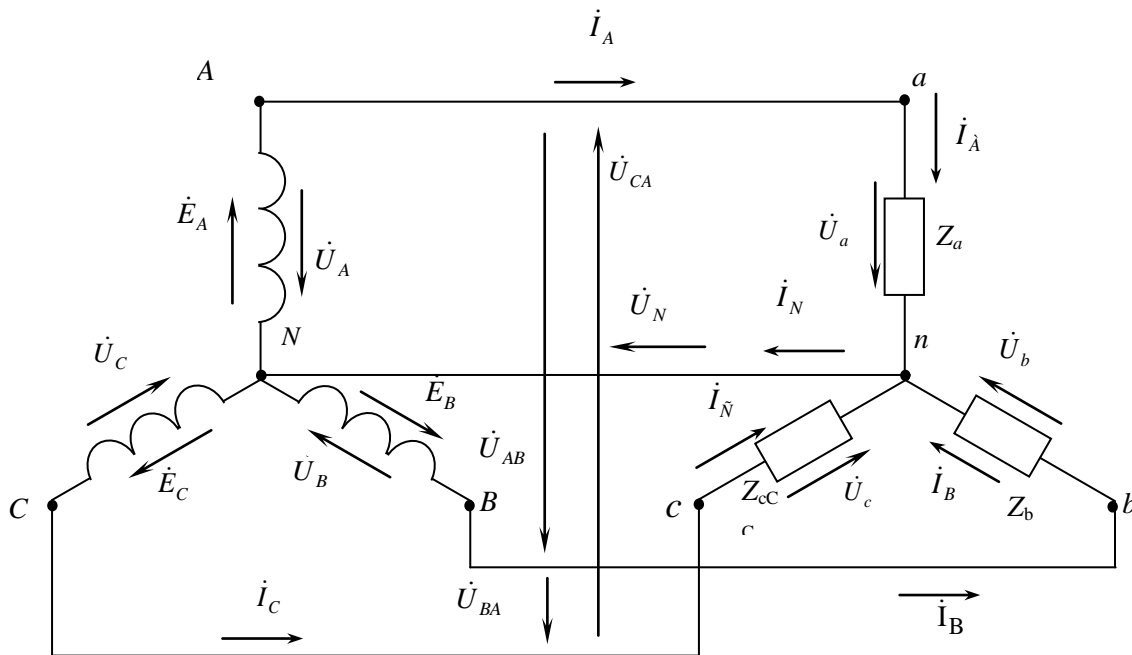


Рис. 1



Напруги на затискачах фаз генератора або приймача називаються фазними і позначаються:  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  – фазні напруги генератора;  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  – фазні напруги приймача.

Напруги між лінійними проводами називаються лінійними і позначаються  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ .

При розрахунку трифазних кіл позитивним найчастіше приймають напрям лінійних струмів від генератора до приймача.

Відповідно цьому напрямку і позначається позитивний напрям інших електричних величин (рис. 1).

При з'єднанні фаз «зіркою», лінійні струми завжди дорівнюють фазним:  $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$ .

Встановимо зв'язки між лінійною і фазною напругами. Для цього побудуємо топографічну діаграму фазної напруги генератора (рис. 2).

Лінійні напруги дорівнюють:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

З цих співвідношень виходить, що сума лінійної напруги завжди дорівнює нулю, тобто:

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0.$$

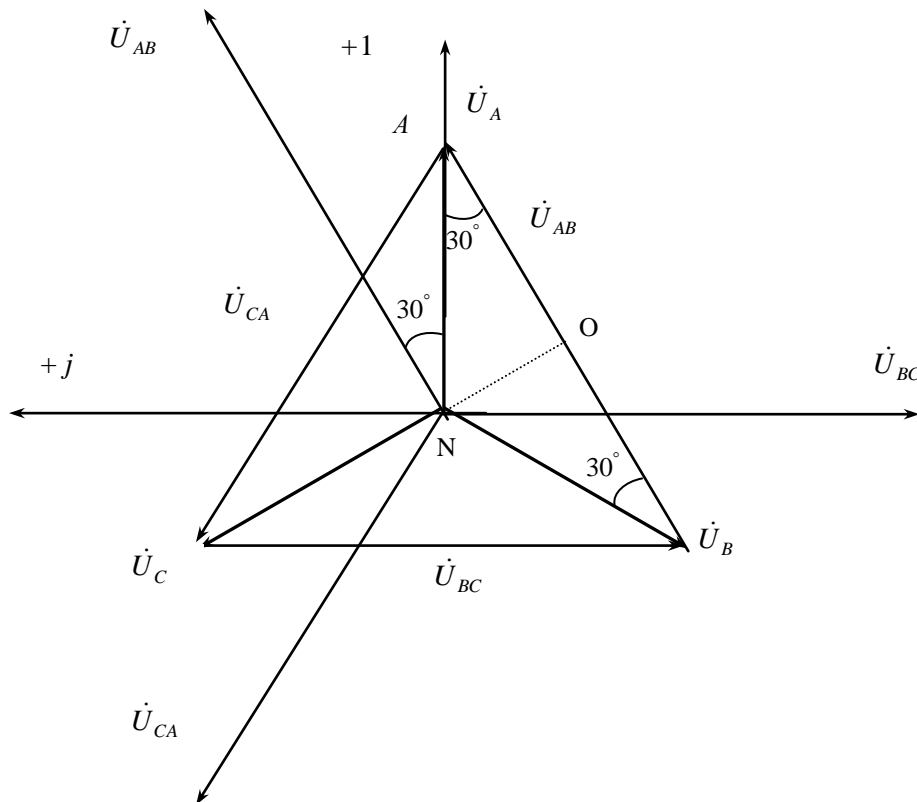


Рис. 2

Дане рівняння застосовується для перевірки правильності розв'язання задачі.

Виведемо співвідношення між лінійною і фазною напругами для симетричної системи напруг з трикутника  $ANO$ .

$$\frac{1}{2}U_{\pi} = U_{\phi} \cos 30^{\circ} = U_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2},$$

звідки

$$U_{\pi} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}.$$

При цьому вектори лінійної напруги випереджають фазні на кут  $30^{\circ}$ , тобто

$$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}\dot{U}_A e^{j30^{\circ}}, \dot{U}_{BC} = \sqrt{3}\dot{U}_B e^{j30^{\circ}}, \dot{U}_{CA} = \sqrt{3}\dot{U}_C e^{j30^{\circ}}$$

і утворюють симетричну зірку лінійних напруг.

Таким чином, в трифазному колі, з'єднаному «зіркою», при симетричній системі фазних напруг, лінійна напруга в  $\sqrt{3}$  разів більше фазної.

При симетричному навантаженні, тобто якщо  $Z_a = Z_b = Z_c = Z_{\phi}$  струм в нейтральному проводі відсутній. Це можна показати на діаграмах (рис. 3, а і б).

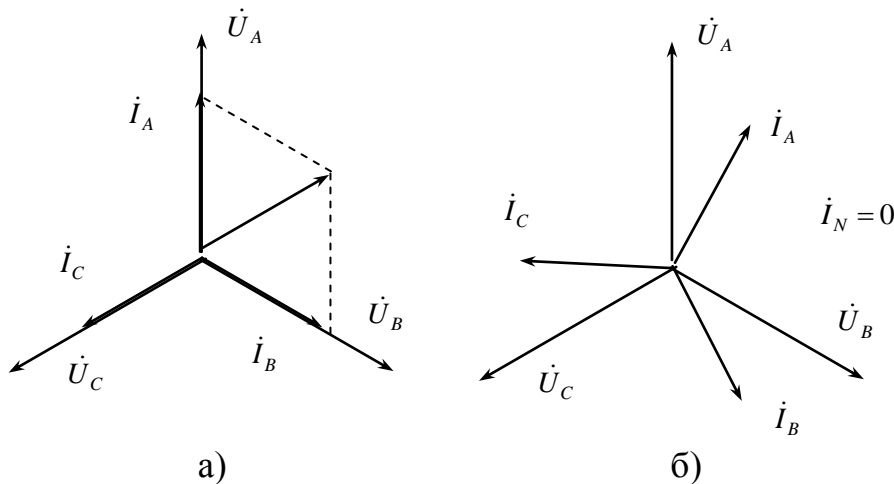


Рис. 3

На рис. 3, а зображена векторна діаграма для трьох однакових активних опорів, а на рис. 3, б – для трьох однакових котушок (наприклад, асинхронний двигун).

В обох випадках струм в нейтральному проводі дорівнює нулю:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

Отже, при симетричному навантаженні використовують трипроводну систему.

Розглянемо процеси при несиметричному навантаженні. Знайдемо напругу зміщення  $\dot{U}_N$  за методом вузлових потенціалів. Нехтуючи опором нейтрального проводу, запишемо:

$$\dot{U}_N = \dot{U}_{nN} = \frac{\sum_{k=1}^3 \dot{E}_k Y_k}{\sum_{k=1}^3 Y_k} = \frac{\dot{E}_A Y_a + \dot{E}_B Y_b + \dot{E}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}.$$

Переріз нейтрального проводу, як правило, береться меншим перерізу лінійних проводів.

В трифазній системі без нейтрального проводу, нехтуючи внутрішнім опором фаз джерела, можна вважати, що

$$\dot{E}_A = \dot{U}_A, \quad \dot{E}_B = \dot{U}_B, \quad \dot{E}_C = \dot{U}_C.$$

Тоді за другим законом Кірхгофа для схеми на рис. 2 запишемо:

$$\dot{U}_A - \dot{U}_N - \dot{U}_a = 0;$$

$$\dot{U}_B - \dot{U}_N - \dot{U}_b = 0;$$

$$\dot{U}_C - \dot{U}_N - \dot{U}_c = 0.$$

Звідки:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_N;$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_N; \tag{1}$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_N.$$

При симетричному навантаженні  $\dot{U}_N = 0$ , напруги на фазах приймача дорівнюють напрузі на фазах генератора.

При несиметричному навантаженні:

$$Z_a \neq Z_b \neq Z_c,$$

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_N \neq 0.$$

Напруга зміщення так само не дорівнює нулю:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A Y_a + \dot{U}_B Y_b + \dot{U}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \neq 0.$$

Враховуючи рівняння (1) і топографічну діаграму на рис. 4, фазні напруги приймача можуть істотно відрізнитися одна від іншої, а також і від напруги (ЕРС) фаз джерела.

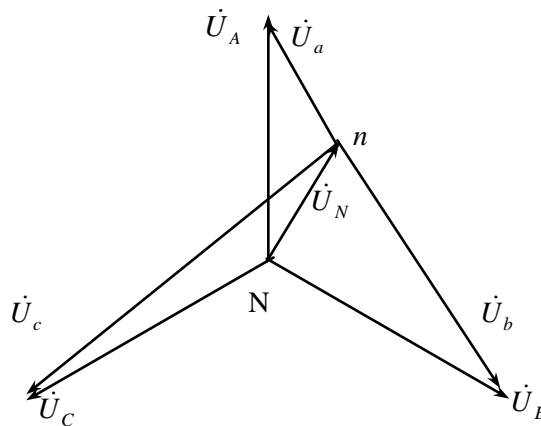


Рис. 4

Такий режим роботи кола є недопустимим, оскільки приймачі розраховуються на певну номінальну напругу. Наявність нейтрального проводу забезпечує рівність  $\dot{U}_N$  нулю, і напруги на фазах навантаження будуть дорівнювати напрузі на фазах генератора:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C.$$



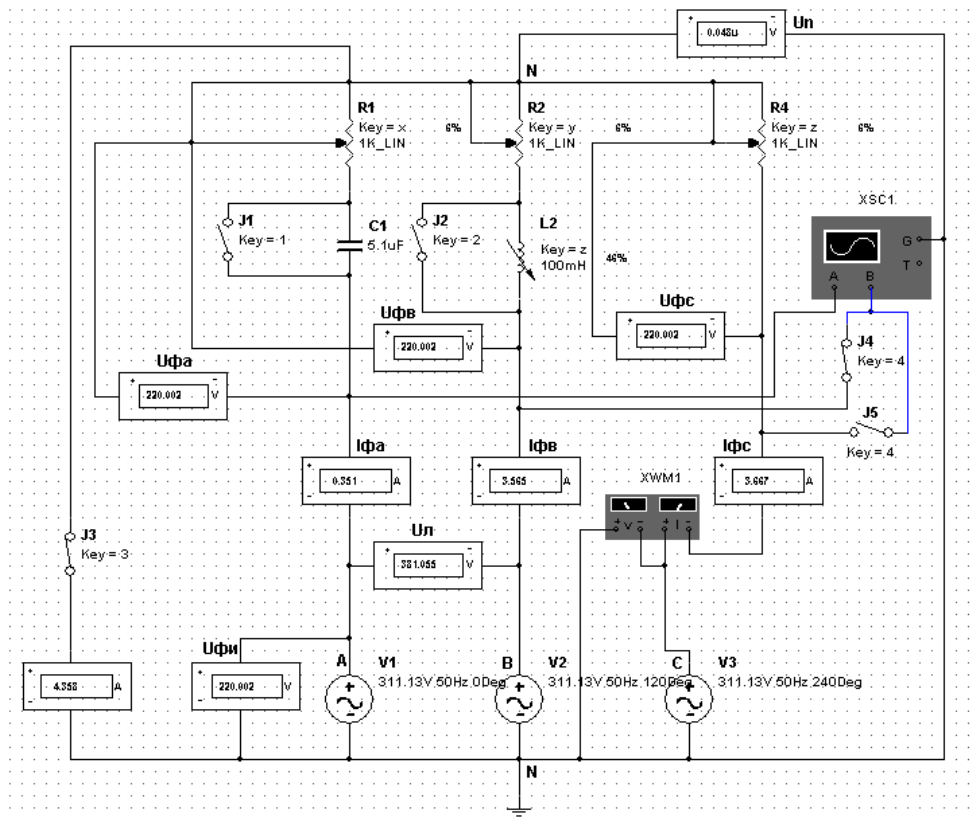


Рис. 5

4. Провести розрив нейтрального проводу натисненням клавiшi 3 (перемикач 3 розмикається). Зняти показання приладiв i занести в табл. 3. Розрахувати основнi параметри кола й побудувати векторнi диаграми.

Таблиця 3

$U_{\text{фдж}}$ , $B$	$U_{\text{л}}$ , $B$	$U_{\text{фа}}$ , $B$	$U_{\text{фб}}$ , $B$	$U_{\text{фс}}$ , $B$	$I_{\text{фа}}$ , $A$	$I_{\text{фб}}$ , $A$	$I_{\text{фс}}$ , $A$	$I_{\text{н}}$ , $A$	$P_{\text{ф}}$ , $Bm$	$R_1$ , $Om$	$R_2$ , $Om$	$R_3$ , $Om$	$C_1$ , $мкФ$

5. В коло фази В пiдключити iндуктивнiсть  $L1$ , натиснувши клавiшу 2 (перемикач 1 розiмкнений). Увiмкнути стенд, показання приладiв занести в табл. 4.

Таблиця 4

$U_{\text{фдж}}$ , $B$	$U_{\text{л}}$ , $B$	$U_{\text{фа}}$ , $B$	$U_{\text{фб}}$ , $B$	$U_{\text{фс}}$ , $B$	$I_{\text{фа}}$ , $A$	$I_{\text{фб}}$ , $A$	$I_{\text{фс}}$ , $A$	$I_{\text{н}}$ , $A$	$P_{\text{ф}}$ , $Bm$	$R_1$ , $Om$	$R_2$ , $Om$	$R_3$ , $Om$	$L_1$ , $мГн$

Розрахувати основнi параметри кола й побудувати векторнi диаграми.

6. Провести розрив нейтрального проводу натисненням клавiшi 3 (перемикач 3 розмикається). Зняти показання приладiв i занести в табл. 5. Розрахувати основнi параметри кола й побудувати векторнi диаграми.

Таблиця 5

$U_{\text{фдж}}$ , $B$	$U_{\text{л}}$ , $B$	$U_{\text{фа}}$ , $B$	$U_{\text{фб}}$ , $B$	$U_{\text{фс}}$ , $B$	$U_{\text{н}}$ , $B$	$I_{\text{фа}}$ , $A$	$I_{\text{фб}}$ , $A$	$I_{\text{фс}}$ , $A$	$I_{\text{н}}$ , $A$	$P_{\text{ф}}$ , $Bm$	$R_1$ , $Om$	$R_2$ , $Om$	$R_3$ , $Om$

7. Зробити основнi висновки.

8. Оформити звіт.

## Лабораторне заняття № 4.2

### Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧА ТРИКУТНИКОМ

**Мета роботи.** Дослідження трифазного кола змінного струму з'єданого «трикутником» при симетричному і несиметричному навантаженні.

#### Теоретичні положення

З'єднанням фаз за схемою «трикутник» називають таке з'єднання, при якому початок кожної фази генератора (приймача) приєднується до кінця попередньої фази генератора (приймача). Можна користуватися й іншим визначенням. З'єднанням фаз за схемою «трикутник» називають таке з'єднання, при якому кінець першої фази генератора (приймача) з'єднується з початком другої фази, кінець другої з початком третьої і кінець третьої з початком першої. Схема такого з'єднання показана на рис. 1.

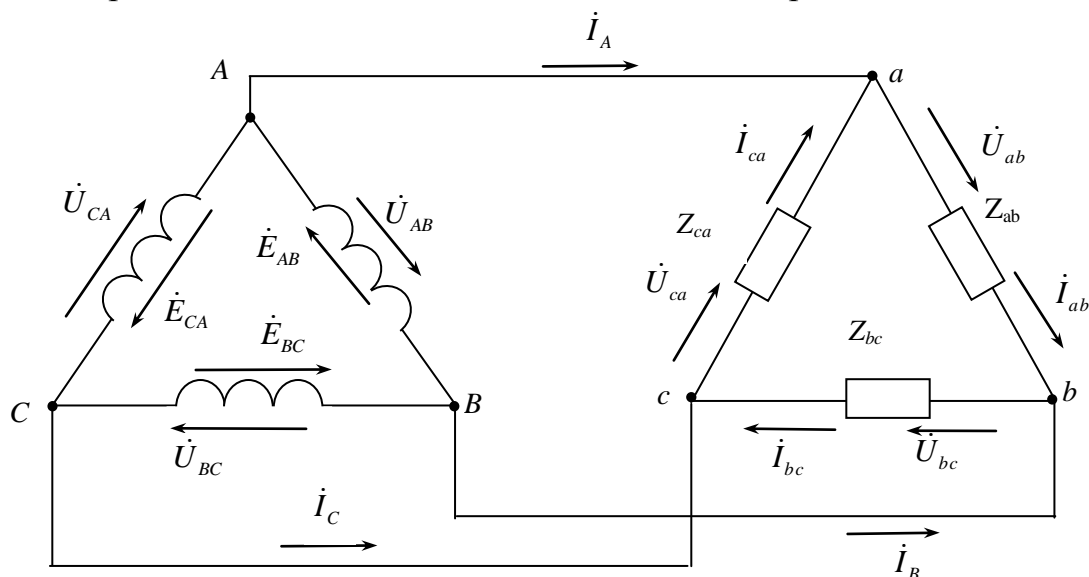


Рис. 1

В результаті цього з'єднання три фазні обмотки генератора утворюють замкнений контур. При симетричній системі ЕРС і правильному з'єднанні фаз генератора завжди виконується правило:

$$\dot{E}_{AB} + \dot{E}_{BC} + \dot{E}_{CA} = 0.$$

З'єднувати трикутником обмотки генератора при несиметричній трифазній системі ЕРС неприпустимо, оскільки це може призвести до короткого замикання.

Якщо не враховувати опір лінійних проводів і обмоток джерел, то лінійна напруга на фазах генератора дорівнює фазним на приймачі, тобто:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}, \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}, \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca},$$

звідки  $U_{л} = U_{\phi}$ .

Струми в приймачі (споживачі) називаються фазними ( $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ ), а струми в лінійних проводах називаються лінійними ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ).

Позитивні напрями струмів наведені на рис. 1.

У зв'язку з тим, що в даному колі відсутній нейтральний провід і трифазна система трипровідна, завжди виконується рівність:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

Це рівняння використовується для перевірки правильності розв'язання задач.

Визначимо лінійні струми за першим законом Кірхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Побудуємо топографічну діаграму напруг і струмів при симетричному навантаженні, коли  $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_\phi$  (рис. 2).

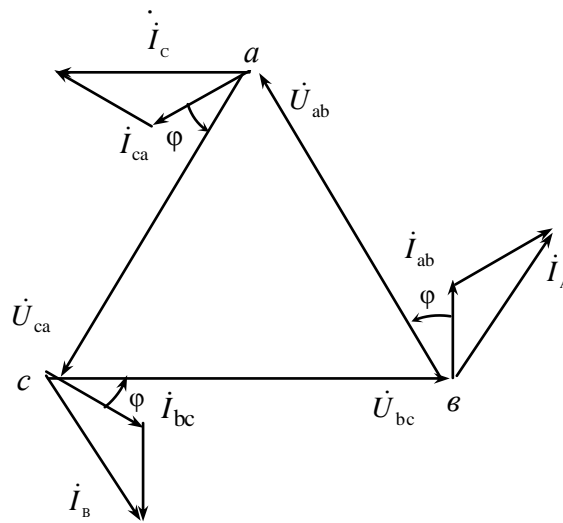


Рис. 2

Співвідношення між  $\dot{I}_л$  та  $\dot{I}_\phi$  при симетричному навантаженні можна отримати з трикутника струмів аналогічно тому, як це зробили при з'єднанні «зіркою» відносно  $U_л$  та  $U_\phi$ :

$$\frac{1}{2} I_л = I_\phi \cos 30^\circ = I_\phi \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Звідки

$$I_л = \sqrt{3} I_\phi.$$

Лінійні струми відстають від фазних на кут  $30^\circ$  і утворюють симетричну зірку струмів.

Основною перевагою з'єднання фаз приймача трикутником є те, що при зміні опору однієї з фаз режим роботи інших фаз залишається незмінним, оскільки лінійна напруга генератора є постійною (змінюватиметься тільки струм даної фази). Тому схема з'єднання трикутником широко використовується для включення несиметричного навантаження, коли всі фази працюють незалежно одна від одної.





4. В коло фази В підключити індуктивність  $LI$ , натиснувши клавiши 1 та 2 (перемикач 2 розiмкнений, 1 – замкнений). Ввiмкнути стенд, показання приладiв занести в табл. 3.

Розрахувати основнi параметри кола i побудувати векторнi дiаграми.

Таблиця 3

$U_{\phi},$ $B$	$U_{л},$ $B$	$U_{ab},$ $B$	$U_{bc},$ $B$	$U_{ca},$ $B$	$I_{\phi a},$ $A$	$I_{\phi b},$ $A$	$I_{\phi c},$ $A$	$I_{ab},$ $A$	$I_{bc},$ $A$	$I_{ca},$ $A$	$P_{\phi},$ $Вт$	$R_1,$ $Ом$	$R_2,$ $Ом$	$R_3,$ $Ом$

Розрахувати основнi параметри кола i побудувати векторнi дiаграми.

5. Зробити основнi висновки.

6. Оформити звiт.

### Лабораторне заняття № 4.3

#### Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ПРИ АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ

#### Мета роботи.

Дослідження трифазного кола змінного струму з'єднаного «зіркою» при аварійних режимах.

#### Теоретичні положення

**Обрив фази.** Розглянемо випадок обриву фази  $A$  (наприклад, при перегорянні запобіжника). Це буде режим холостого ходу даної фази, тобто  $Z_a = \infty$ , а  $Y_a = 0$ . Якщо навантаження інших фаз симетричне ( $Y_b = Y_c = Y$ ), то напруга зміщення:

$$\dot{U}_N = \frac{(\dot{U}_B + \dot{U}_C)Y}{2Y} = -\frac{1}{2}\dot{U}_A.$$

Топографічна діаграма наведена на рис. 1. З діаграми видно, що точка  $n$  завжди знаходиться на середині сторони трикутника, яка протилежна його вершині  $A$  ( $B$  або  $C$  в інших випадках), відповідній обірваній фазі.

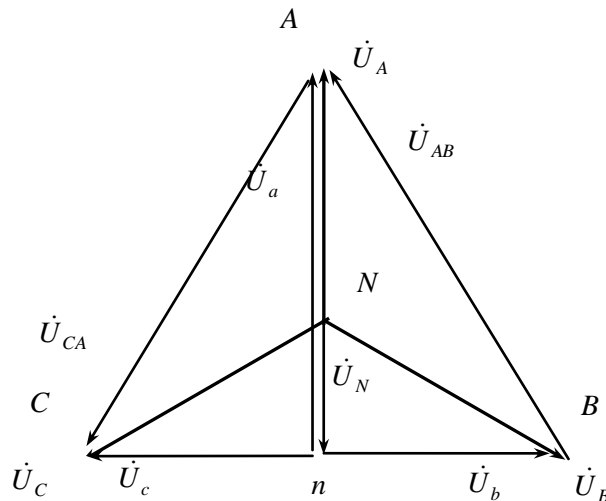


Рис.1

Тоді  $\dot{U}_a = U_n \sin 60^\circ = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_A \sin 60^\circ = 1,5\dot{U}_A$ ;  $\dot{U}_b = 0,5\dot{U}_{BC}$ ;  $\dot{U}_c = -\dot{U}_b$ .

Тобто, якщо при розрахунку задати, що  $\dot{U}_A = \dot{U}_A e^{j0^\circ}$ , то:

$$\dot{U}_a = 1,5\dot{U}_A, \dot{U}_b = \frac{\sqrt{3}}{2}U_A e^{-j90^\circ}, \dot{U}_c = \frac{\sqrt{3}}{2}U_A e^{j90^\circ}.$$

**Коротке замикання.** Наприклад, відбулося коротке замикання фази  $A$  ( $Z_a = 0$ ,  $Y_a = \infty$ ),  $\dot{U}_a = 0$ , точки  $a$  і  $n$  стають рівнопотенціальними (рис. 2, а) і за другим законом Кірхгофа

$$\dot{U}_a + \dot{U}_N - \dot{U}_A = 0, \quad \dot{U}_N = \dot{U}_A.$$

Точка  $n$  співпадає з точкою  $A$ , при цьому (рис. 2, б):

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_A \Rightarrow \dot{U}_b = -\dot{U}_{AB};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_{CA} \Rightarrow \dot{U}_c = \dot{U}_{CA}.$$

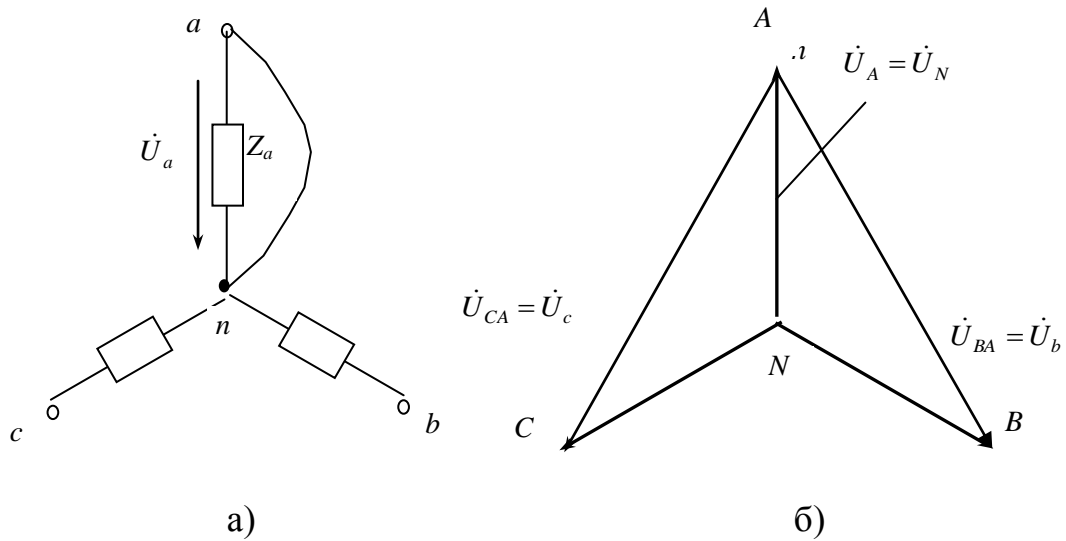


Рис. 2

Таким чином, положення точки  $n$  визначиться положенням кінця вектора напруги фази генератора, в якій відбулося коротке замикання. При цьому точка  $n$  співпадає з точками  $A$ ,  $B$  або  $C$  (при відповідних коротких замиканнях).

### Порядок виконання роботи

1. Отримати у викладача значення ЕРС джерела та зібрати з елементів схему на рис. 3. При складанні схеми необхідно правильно включити однофазні генератори з урахуванням початкової фази.

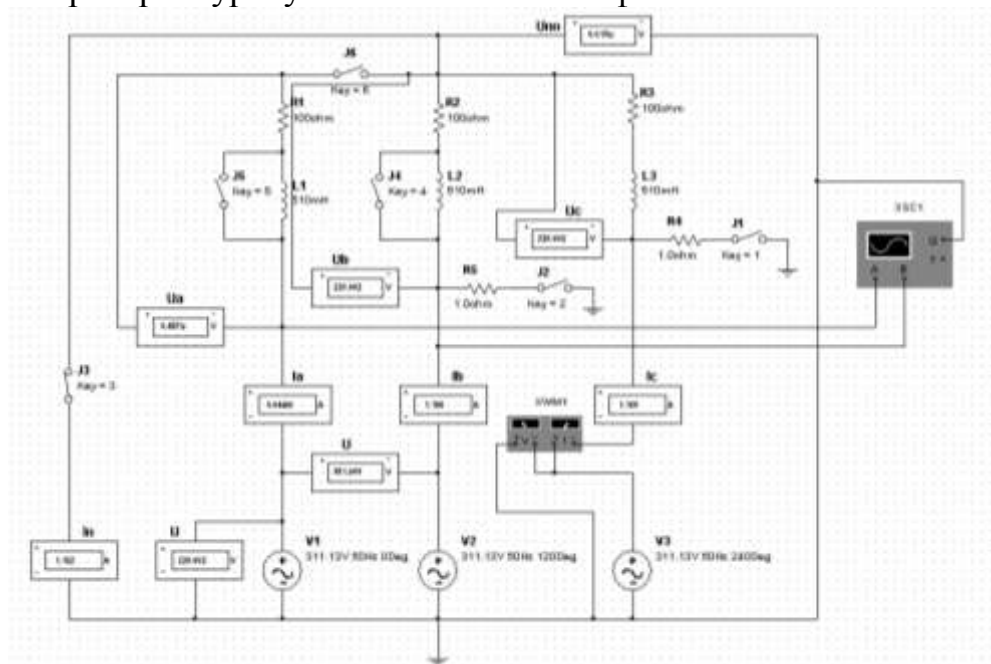


Рис. 3

2. Дослідження трифазного кола при симетричному навантаженні. При вимкненому стенді розімкнуті перемикачі 1, 2, 4, 5 (керування положенням перемикачів здійснюється натисненням відповідно клавіш 1, 2, 4, 5). Перемикачі 3, 6 замкнені. Увімкнути стенд, показання приладів занести в табл. 1.

Таблиця 1

$U_{\phi},$ $B$	$U_{л},$ $B$	$U_a,$ $B$	$U_b,$ $B$	$U_c,$ $B$	$I_a,$ $A$	$I_b,$ $A$	$I_c,$ $A$	$I_0,$ $A$	$U_{nn},$ $B$	$P_{\phi},$ $Bт$	$R_1,$ $Ом$	$R_2,$ $Ом$	$R_3,$ $Ом$	$L,$ $мГн$

Розрахувати основні параметри кола і побудувати векторні діаграми.

3. Дослідження трифазної системи при несиметричному навантаженні. В колах фаз А і В виключити індуктивності, замкнувши перемикачі 4 і 5 натисканням клавіш 4 і 5. Увімкнути стенд, показання приладів занести в табл. 2.

Таблиця 2

$U_{\phi},$ $B$	$U_{л},$ $B$	$U_a,$ $B$	$U_b,$ $B$	$U_c,$ $B$	$I_a,$ $A$	$I_b,$ $A$	$I_c,$ $A$	$I_0,$ $A$	$U_{nn},$ $B$	$P_{\phi},$ $Bт$	$R_1,$ $Ом$	$R_2,$ $Ом$	$R_3,$ $Ом$	$L,$ $мГн$

Розрахувати основні параметри кола і побудувати векторні діаграми.

3. Дослідження трифазного кола при обриві фази. При вимкненому стенді розімкнуті перемикачі 4, 5 (керування положенням перемикачів здійснюється натисненням клавіш 4 і 5). Перемикачі 1, 2 розімкнені, а 3 – замкнений. Натиснувши клавішу 6, здійснити обрив фази А. Увімкнути стенд, показання приладів занести в табл. 3.

Таблиця 3

$U_{\phi},$ $B$	$U_{л},$ $B$	$U_a,$ $B$	$U_b,$ $B$	$U_c,$ $B$	$I_a,$ $A$	$I_b,$ $A$	$I_c,$ $A$	$I_0,$ $A$	$U_{nn},$ $B$	$P_{\phi},$ $Bт$	$R_1,$ $Ом$	$R_2,$ $Ом$	$R_3,$ $Ом$	$L,$ $мГн$

Розрахувати основні параметри кола і побудувати векторні діаграми.

4. Дослідження трифазного кола при обриві фази і обриві нейтрального проводу. Провести обрив нейтрального проводу, натиснувши клавішу 3 (перемикач розімкнений). Увімкнути стенд, показання приладів занести в табл. 4.

Таблиця 4

$U_{\phi},$ $B$	$U_{л},$ $B$	$U_a,$ $B$	$U_b,$ $B$	$U_c,$ $B$	$I_a,$ $A$	$I_b,$ $A$	$I_c,$ $A$	$I_0,$ $A$	$U_{nn},$ $B$	$P_{\phi},$ $Bт$	$R_1,$ $Ом$	$R_2,$ $Ом$	$R_3,$ $Ом$	$L,$ $мГн$

Розрахувати основні параметри кола і побудувати векторні діаграми.

5. Дослідження трифазного кола при однофазному короткому замиканні. Перемикачі 4, 5 розімкнені, а 3, 6 – замкнені. Натиснувши клавішу 1 здійснити режим однофазного короткого замикання (1 – замкнений, а 2 – розімкнений). Увімкнути стенд, показання приладів занести в табл. 5

Таблиця 5

$U_{\phi},$ $B$	$U_{л},$ $B$	$U_a,$ $B$	$U_b,$ $B$	$U_c,$ $B$	$I_a,$ $A$	$I_b,$ $A$	$I_c,$ $A$	$I_0,$ $A$	$U_{nn},$ $B$	$P_{\phi},$ $Bт$	$R_1,$ $Ом$	$R_2,$ $Ом$	$R_3,$ $Ом$	$L,$ $мГн$

Розрахувати основні параметри кола і побудувати векторні діаграми.

6. Дослідження трифазного кола при однофазному короткому замиканні і обриві нейтрального проводу. Перемикачі 4, 5 розімкнені, а 6 – замкнений. Натиснувши клавішу 3 здійснити обрив нейтрального проводу (перемикач 3 розімкнений) при режимі однофазного короткого замикання (1 – замкнений, а 2 – розімкнений). Увімкнути стенд, показання приладів занести в табл. 6.

Таблиця 6

$U_{\phi},$ $B$	$U_{л},$ $B$	$U_a,$ $B$	$U_b,$ $B$	$U_c,$ $B$	$I_a,$ $A$	$I_b,$ $A$	$I_c,$ $A$	$I_0,$ $A$	$U_{nn},$ $B$	$P_{\phi},$ $Bт$	$R_1,$ $Ом$	$R_2,$ $Ом$	$R_3,$ $Ом$	$L,$ $мГн$

Розрахувати основні параметри кола і побудувати векторні діаграми.

7. Дослідження трифазного кола при двофазному короткому замиканні. Перемикачі 4, 5 розімкнені, а 3, 6 – замкнені. Натиснувши клавіші 1 і 2 здійснити режим двофазного короткого замикання (1 і 2 – замкнені). Увімкнути стенд, показання приладів занести в табл. 7.

Таблиця 7

$U_{\phi},$ $B$	$U_{л},$ $B$	$U_a,$ $B$	$U_b,$ $B$	$U_c,$ $B$	$I_a,$ $A$	$I_b,$ $A$	$I_c,$ $A$	$I_0,$ $A$	$U_{nn},$ $B$	$P_{\phi},$ $Bт$	$R_1,$ $Ом$	$R_2,$ $Ом$	$R_3,$ $Ом$	$L,$ $мГн$

Розрахувати основні параметри кола і побудувати векторні діаграми.

8. Дослідження трифазного кола при двофазному короткому замиканні і обриві нейтрального проводу. Перемикачі 4, 5 розімкнені, а 6 – замкнений. Натиснувши клавішу 3 здійснити обрив нейтрального проводу (перемикач 3 розімкнений) при режимі двофазного короткого замикання (1 і 2 – замкнені). Увімкнути стенд, показання приладів занести в табл. 8. Розрахувати основні параметри кола і побудувати векторні діаграми.

Таблиця 8

$U_{\phi},$ $B$	$U_{л},$ $B$	$U_a,$ $B$	$U_b,$ $B$	$U_c,$ $B$	$I_a,$ $A$	$I_b,$ $A$	$I_c,$ $A$	$I_0,$ $A$	$U_{nn},$ $B$	$P_{\phi},$ $Bт$	$R_1,$ $Ом$	$R_2,$ $Ом$	$R_3,$ $Ом$	$L,$ $мГн$

9. Зробити основні висновки.

10. Оформити звіт.

### Лабораторне заняття № 4.3

#### Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

##### Мета роботи.

Дослідження часових характеристик лінійного кола несинусоїдного струму.

##### Теоретичні положення

Несинусоїдними періодичними називають ЕРС, струми і напруги, що змінюються в часі за несинусоїдним періодичним законом. Вони виникають, якщо: 1) джерело ЕРС (струму) генерує несинусоїдну ЕРС (струм), а всі елементи кола лінійні; 2) джерело ЕРС (джерело струму) генерує синусоїдну ЕРС (струм), але один або декілька елементів кола нелінійні.

Форма несинусоїдних ЕРС, струмів і напруг може бути різною. Наприклад, в електронних пристроях широко використовуються блоки живлення, на виході яких діє напруга, отримана в результаті однопівперіодного (рис.1, а) або двопівперіодного (рис.1, б) випрямлення синусоїдної ЕРС (напруги). У вимірювальних і цифрових пристроях дуже часто на вході діють сигнали пилкоподібної або прямокутної форми (рис.1, в і г).

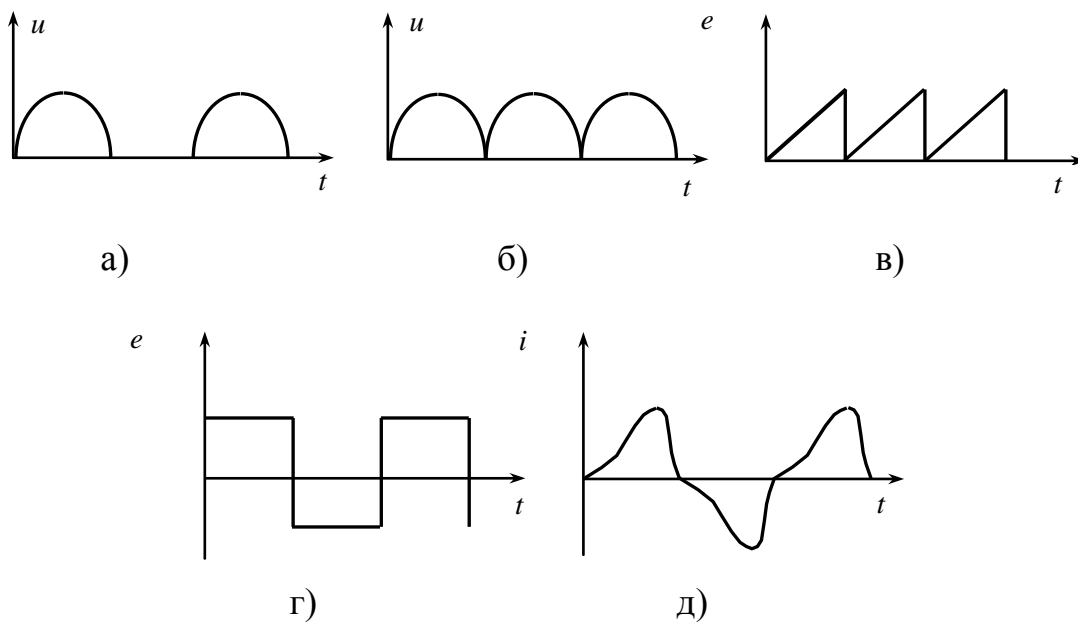


Рис. 1

У колах із котушкою індуктивності з феромагнітним осердям, навіть при синусоїдних ЕРС, струм змінюється за несинусоїдним законом (рис. 1, д).

Аналіз роботи подібних пристроїв пов'язаний з розрахунком режимів роботи лінійних кіл, в яких діють несинусоїдні джерела напруги або струму. Суть розрахунку таких кіл полягає в наступному:

1) несинусоїдні періодичні ЕРС, напруги або струми, задані в схемі за допомогою апарату гармонічного аналізу, представляються у вигляді рядів Фур'є, які в загальному випадку містять постійну складову, основну або першу гармоніку, період якої дорівнює періоду самої функції, і вищі гармоніки, частота яких в ціле число разів більше частоти першої гармоніки;

2) проводиться розрахунок кола для кожної з гармонік окремо:

– для постійної складової методами розрахунку кіл постійного струму, при цьому  $R = r$ ;  $\omega t = 0$ ;  $1/\omega C = \infty$ ;

– для кожної гармоніки методами розрахунку кіл синусоїдного змінного струму, враховуючи, що для котушки  $X_{kL} = k\omega L$ , а для конденсатора  $X_{kC} = 1/k\omega C$ ;

3) дійсні струми віток і напруги у вітках схеми визначаються як алгебричні суми струмів і напруг окремих складових.

Залежно від виду графіків несинусоїдних періодичних функцій може мінятися структура гармонічного ряду Фур'є. В деяких випадках несинусоїдна функція має неповний склад у ряді розкладання.

*Несинусоїдна функція симетрична відносно осі абсцис.*

Функція називається симетричною відносно осі абсцис (рис. 2), якщо вона задовольняє умові:  $f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$ .

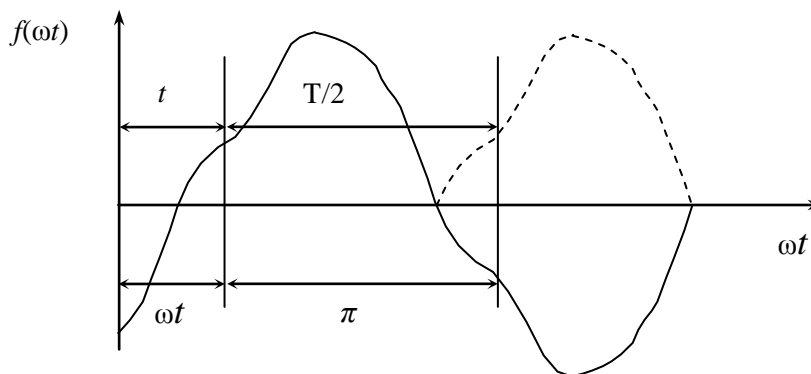


Рис. 2

Функція такого вигляду в розкладанні не має постійної складової і парних гармонік:

$$f(\omega t) = B_{1m}\sin(\omega t) + B_{3m}\sin(3\omega t) + \dots + C_{1m}\cos(\omega t) + C_{3m}\cos(3\omega t) + \dots$$

3). *Несинусоїдна парна функція.* Функція парна, якщо  $f(-\omega t) = f(\omega t)$  (рис. 3).

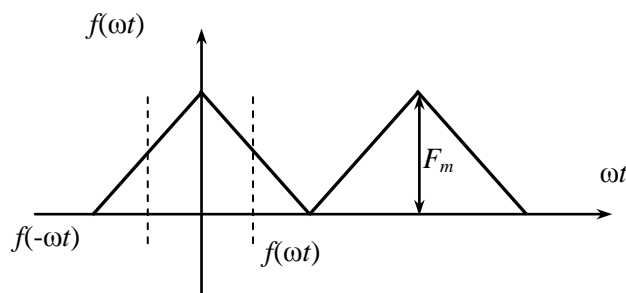


Рис. 3

Функція цього вигляду в розкладанні не має синусоїд, тобто:

$$f(\omega t) = A_0 + C_{1m}\cos(\omega t) + C_{2m}\cos(2\omega t) + C_{3m}\cos(3\omega t) + \dots$$

*Несинусоїдна непарна функція.* Несинусоїдна функція називається непарною, якщо  $f(\omega t) = -f(-\omega t)$  (рис. 4).

Функція цього виду не містить постійної складової та косинусоїд:

$$f(\omega t) = B_{1m}\sin(\omega t) + B_{2m}\sin(2\omega t) + B_{3m}\sin(3\omega t) + \dots$$

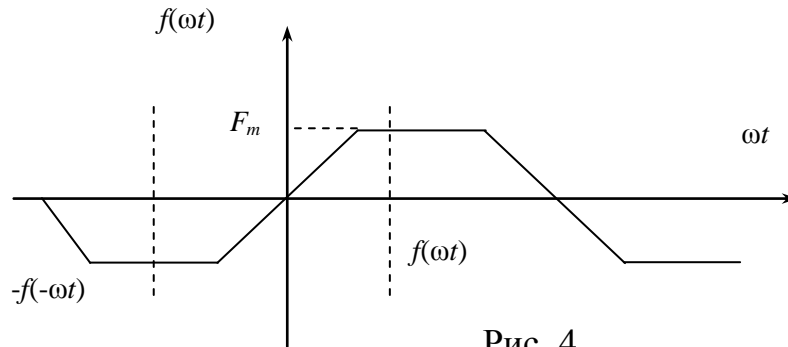


Рис. 4

Для характеристики форми несинусоїдних періодичних кривих використовують наступні коефіцієнти: коефіцієнт спотворення  $K_C$ ; коефіцієнт амплітуди  $K_A$ ; коефіцієнт форми кривої  $K_\Phi$ .

Коефіцієнтом *амплітуди* називається відношення максимального значення до діючого:

$$K_A = \frac{F_m}{F}$$

Для синусоїди  $K_A = \sqrt{2} = 1,41$ .

Коефіцієнтом форми несинусоїдної періодичної кривої, симетричної відносно осі абсцис, називається відношення діючого значення до середнього за половину періоду:

$$K_\Phi = \frac{F}{F_{\text{сеп}}}$$

Для синусоїди  $K_\Phi = \frac{F_m}{\sqrt{2}} : \frac{2}{\pi} F_m = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ .

Коефіцієнтом *спотворення* називається відношення діючого значення основної гармоніки до повного діючого значення:

$$K_C = \frac{F_1}{F}$$

Для синусоїди  $K_C = 1$ .

В електротехніці і радіотехніці для оцінки спотворень користуються коефіцієнтом гармонік, який визначається як відношення діючих значень вищих гармонік до діючого значення основної гармоніки:

$$K = \frac{1}{F_1} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} F_k^2}$$

За відсутності постійної складової



$$K = \frac{1}{K_C} \sqrt{1 - K_C^2}.$$

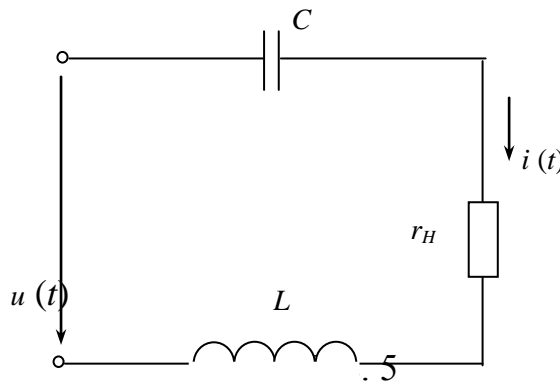
Для синусоїди  $K=0$ .

*Електричним фільтром* називають пристрій, що служить для зміни частотного спектру сигналу. Резонансні фільтри є простими фільтрами. В них використовуються резонансні режими в несинусоїдних періодичних колах.

За допомогою резонансних фільтрів можна виділяти потрібну гармоніку або навпаки, пригнічувати залежно від того, як з'єднані котушки індуктивності і конденсатор і в якому режимі працює несинусоїдне коло.

При аналізі резонансних режимів вважатимемо, що котушка і конденсатор є ідеальними елементами і їх активні опори дорівнюють нулю.

На рис. 5 зображена схема послідовного з'єднання  $r_H, L, C$ .



Якщо індуктивність і ємність цього кола вибрати з умови резонансу напруги на частоті  $n\omega$ , тобто взяти  $n\omega L = \frac{1}{n\omega C}$ , то таке коло дозволить виділити  $n$ -у гармоніку струму і в тій чи іншій мірі подавити інші гармоніки струму. Дійсно, на частоті  $n\omega$  опір кола буде дорівнювати  $Z_k = r_H$ , а на частотах, відмінних від  $n\omega$ , він буде більше  $r_H$ :

$$Z_n = r_H + j \left( n\omega L - \frac{1}{n\omega C} \right).$$

В схемі на рис. 6 послідовно з навантаженням включений паралельний контур  $L-C$ . Якщо параметри  $L$  і  $C$  контуру підібрати за умов резонансу струмів для  $k$ -ї гармоніки:

$$\frac{1}{k\omega L} - k\omega C = 0,$$

то опір цього контуру для  $k$ -ї гармоніки буде дорівнювати нескінченності:

$$Z_k = \frac{-jk\omega L \cdot \frac{1}{k\omega C}}{k\omega L - \frac{1}{k\omega C}} = \infty.$$

Отже, струм  $k$ -ї гармоніки в нерозгалуженій частині кола протікати не буде, тобто резонансний фільтр служить для заглушення  $k$ -ї гармоніки.

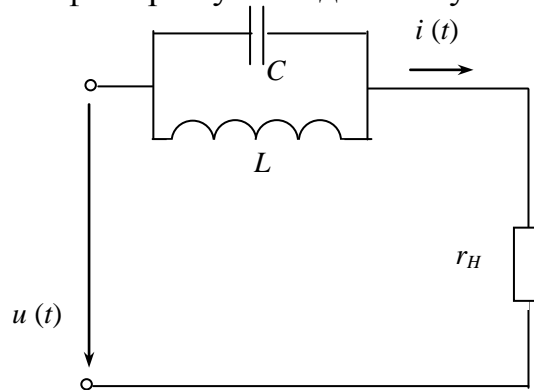


Рис. 6

Комбіновану схему на рис. 7 зручно застосовувати в тих умовах, коли необхідно в навантаженні виділити сигнал однієї гармоніки і заглушити сигнал іншої гармоніки. Наприклад, необхідно виділити в навантаженні  $n$ -у гармоніку і заглушити  $k$ -у.

Для заглушення  $k$ -ї гармоніки необхідно, щоб опір паралельного контуру для цієї гармоніки дорівнював нескінченності:

$$Z_k = \frac{-jk\omega L}{k^2 \omega^2 CL - 1} = \infty,$$

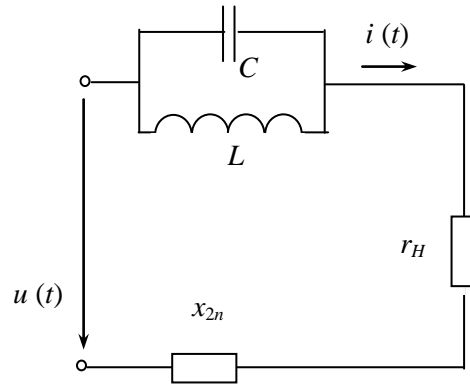


Рис. 7

а це буде за умови, якщо:  $k^2\omega^2CL - 1 = 0$ , або

$$\omega^2 CL = \frac{1}{k^2}. \quad (1)$$

Для виділення в навантаженні  $n$ -ї гармоніки струму, необхідно, щоб вся схема для  $n$ -ї гармоніки була налаштована на резонанс напруг. В цьому випадку опір кола буде дорівнювати опорі навантаження:

$$Z_n = r_H + jx_{2n} - \frac{-jn\omega L}{n^2\omega^2 CL - 1} = r_H.$$

Таким чином, умова виділення повної гармоніки:

$$x_{2n} - \frac{n\omega L}{n^2\omega^2 CL - 1} = 0$$

або із врахуванням (1), отримуємо:

$$x_{2n} - \frac{n\omega L}{\frac{n^2}{k^2} - 1} = 0.$$

Якщо  $n > k$ , то паралельний контур для  $n$ -ї гармоніки має ємнісний характер. Тому для забезпечення умови резонансу напруг послідовно з паралельним контуром необхідно включити індуктивність  $L_2$  ( $x_{2n} = n\omega L_2$ ).

При  $n < k$ , паралельний контур для  $n$ -ї гармоніки має індуктивний характер. Тому послідовно з ним доцільно включити ємність  $C_2$  ( $x_{2n} = 1/n\omega C_2$ ).

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати з елементів схеми однопівперіодного і двопівперіодного випрямлення (рис. 8).
2. Увімкнути установку. Замалювати часові діаграми з осцилографів для одноіперіодного і двопівперіодного випрямлення.
3. Провести аналіз гармонічних складових отриманих з часових діаграм.

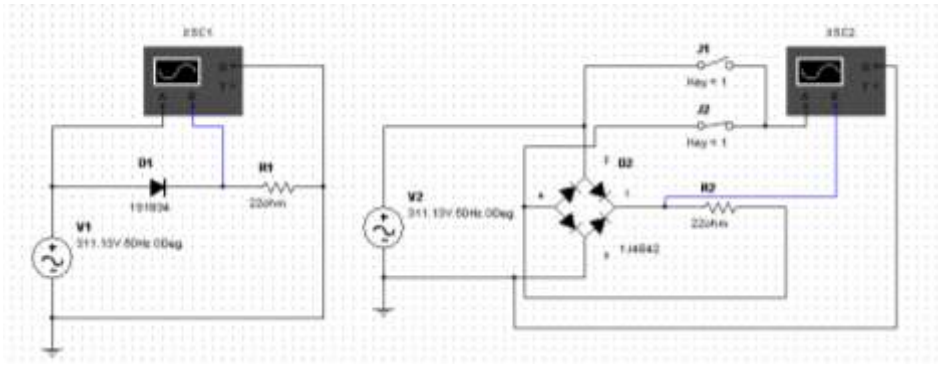


Рис. 8

4. Зібрати з елементів схему комбінованого фільтру (рис. 9).

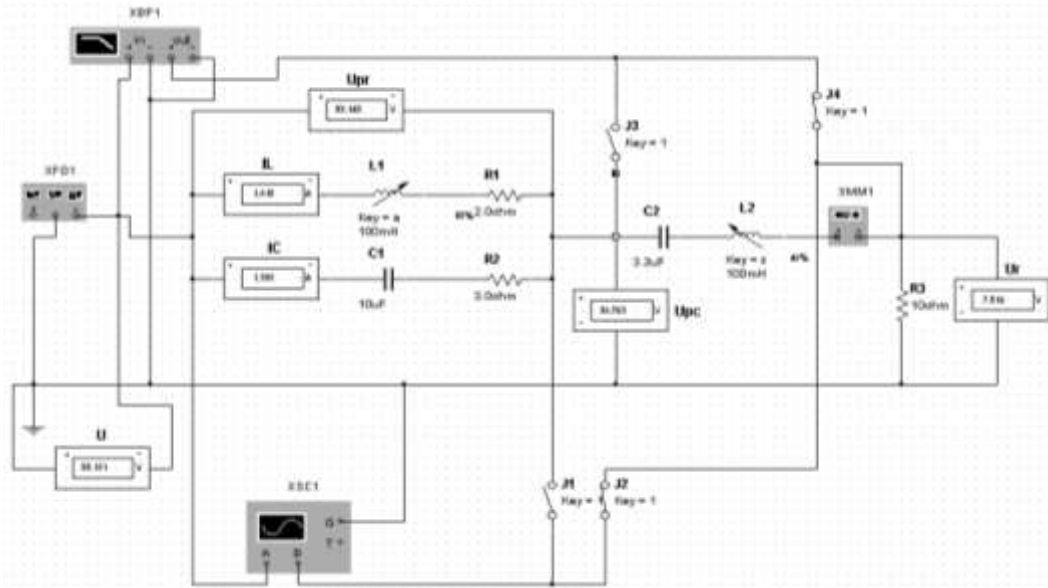


Рис. 9

5. Для заданої частоти генератора, змінюючи параметр індуктивності  $L1$ , добитися умови резонансу паралельного контуру, що відповідає рівності струмів віток коливального контуру (показання амперметрів  $I_L$ ,  $I_C$  однакові). Змінюючи параметр індуктивності  $L2$ , досягти умови резонансу послідовного коливального контуру, що відповідає максимальному струму схеми. Показання приладів занести в табл. 1.

Таблиця 1

$U$ , $B$	$f$ , $Гц$	$I$ , $A$	$I_L$ , $A$	$I_C$ , $A$	$U_{LC}$ , $B$	$U_R$ , $B$	$U_{PC}$ , $B$

6. При резонансі зняти часові діаграми в точці після паралельного резонансного контуру і в точці після послідовного резонансного контуру. Перемикання каналу осцилографа здійснюється натисненням на клавішу 1 (перемикачі  $J1$ ,  $J2$ ).

7. Провести розрахунок резонансної (виділеної) частоти за параметрами резонансних контурів.

8. Зробити основні висновки.

9. Оформити звіт.