

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛАВРІНЕНКО Ю. В.

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ

Частина 1

"Електротехніка"

Конспект лекцій

Одеса
Одеський державний екологічний університет
2016

ББК 32.84
Л 13
УДК 621.37

Рекомендовано методичною радою Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України як конспект лекцій (протокол № 1 від 29. 05. 2016 р.)

Лавриненко Ю. В.

Основи електротехніки та електроніки. Частина 1. Електротехніка: конспект лекцій. Одеса, ОДЕКУ, 2016. 54 с.

В конспекті лекцій викладені теоретичні відомості про електричні кола постійного і змінного струму, принципи роботи асинхронних та синхронних машин.

Даний конспект лекцій призначений для студентів 2 курсу денної форми навчання за спеціальністю "Комп'ютерні науки".

ISBN 978-966-186-005-5

Зміст

Передмова.....	5
1 ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ.....	6
1.1 Резистивний елемент (резистор).....	7
1.2 Індуктивний елемент (котушка індуктивності).....	8
1.3 Ємнісний елемент (конденсатор).....	9
1.4 Джерело електричної енергії.....	9
2 ПРЕДСТАВЛЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНИХ ВЕЛИЧИН ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕКТОРІВ І КОМПЛЕКСНИХ ЧИСЕЛ.....	12
2.1 Зображення синусоїдальних ЕРС, напруги і струмів на площині в декартових координатах.....	13
2.2 Векторне зображення величин, що синусоїдально змінюються.....	14
2.3 Представлення синусоїдальних ЕРС, напруги і струму.....	14
2.4 Діюче значення синусоїдальних ЕРС, напруги і струмів.....	16
3 ЕЛЕМЕНТИ В КОЛІ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ.....	17
3.1 Резистор.....	17
3.2 Конденсатор.....	18
3.3 Котушка індуктивності.....	20
3.4 Послідовне з'єднання резистивного і індуктивного елементів...	22
3.5 Паралельне з'єднання резистивного і ємнісного елементів.....	23
4 ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ. МИТТЄВА, АКТИВНА, РЕАКТИВНА І ПОВНА ПОТУЖНІСТЬ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ.....	26
4.1 Резистор (ідеальний активний опір).....	27
4.2 Котушка індуктивності (ідеальна індуктивність).....	28
4.3 Конденсатор (ідеальна ємність).....	28
4.4 Повна потужність.....	29
5 РЕЗОНАНСИ В КОЛАХ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ	30
5.1 Резонанс в колі з послідовно з'єднаними елементами (резонанс напруги).....	30
5.2 Резонанс в колі з паралельно з'єднаними елементами (резонанс струмів).....	32
6 ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА.....	34
6.1 Загальних відомостей про багатофазні системи.....	34
6.2 Схем з'єднання трифазних систем.....	35

6.3	З'єднання в зірку.....	35
6.4	З'єднання в трикутник.....	37
7	МАГНІТНЕ ПОЛЕ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ.....	40
7.1	Магнітне поле котушки з синусоїдальним струмом.....	40
7.2	Колове магнітне поле, що обертається, двох - і трифазної обмоток.....	40
7.3	Принцип дії асинхронного і синхронного двигунів.....	44
8	БАЗОВИХ ПРИНЦИПІВ ДІЇ ТРАНСФОРМАТОРА.....	46
8.1	Загальних відомостей.....	46
8.2	Режим холостого ходу.....	47
8.3	Режим короткого замикання.....	48
8.4	Режим з навантаженням.....	48
8.5	Закон Фарадея.....	48
8.6	Рівняння ідеального трансформатора.....	49
8.7	Позначення на схемах.....	50
	Література.....	52

ВСТУП

Нині людська цивілізація досягла такого рівня. Що без електричної енергії вона миттєво припинить своє існування. Електроенергія використовується абсолютно в усіх областях життєдіяльності людей. Наука, освіта, промислове виробництво, сільське господарство, транспорт, охорона здоров'я, комунікація, безпека, дозвілля – скрізь використовуються прилади, апарати, пристрої, машини і механізми, що вимагають для своєї роботи електроенергію.

Знання основ і законів електротехніки дозволяє безпечно і ефективно застосовувати усі сучасні засоби в процесі життєдіяльності.

1 ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Електромагнітні процеси, що протікають в електротехнічних пристроях, як правило, досить складні. Проте у багатьох випадках, їх основні характеристики можна описати за допомогою таких інтегральних понять, як: напруга, струм, електрорушійна сила (ЕРС). При такому підході сукупність електротехнічних пристроїв, що складається з відповідним чином сполучених джерел і приймачів електричної енергії, призначених для генерації, передачі, розподілу і перетворення електричної енергії і (чи) інформації, розглядають як **електричне коло**. Електричне коло складається з окремих частин (об'єктів), що виконують певні функції і називаються **елементами кола**. Основними елементами кола є джерела і приймачі електричної енергії (сигналів). Електротехнічні пристрої, що виробляють електричну енергію, називаються **генераторами** або **джерелами електричної енергії**, а пристрої, споживаючі її – **приймачами** (споживачами) електричної енергії.

У кожного елементу кола можна виділити певне число затисків (**полюсів**), за допомогою яких він з'єднується з іншими елементами. Розрізняють **дво** і **багатополюсні елементи**. Двополюсники мають два затиски. До них відносяться джерела енергії, резистори, котушки індуктивності, конденсатори. Багатополюсні елементи – це, наприклад, тріоди, трансформатори, підсилювачі і так далі.

Усі елементи електричного кола умовно можна розділити на **активні** і **пасивні**. Активним називається елемент, що містить у своїй структурі джерело електричної енергії. До пасивних відносяться елементи, в яких розсіюється (резистори) або накопичується (котушка індуктивності і конденсатори) енергія. До основної характеристики елементів кола відносяться їх вольт-амперні характеристики, що описуються диференціальними і алгебраїчними рівняннями. Якщо елементи описуються лінійними, диференціальними або алгеброю рівняннями, то вони називаються **лінійними**, інакше вони відносяться до класу **нелінійних**. Строго кажучи, усі елементи є нелінійними. Можливість розгляду їх як лінійних, що істотно спрощує математичний опис і аналіз процесів, визначається межами зміни характеризуючих їх змінних і їх частот. Коефіцієнти, що зв'язують змінні, їх похідні і інтеграли в цих рівняннях, називаються **параметрами** елементу.

Якщо параметри елементу не є функціями просторових координат, що визначають його геометричні розміри, то він називається **елементом із зосередженими параметрами**. Якщо елемент описується рівняннями, в які входять просторові змінні, то він відноситься до класу елементів з розподіленими параметрами. Класичним прикладом останніх являється лінія передачі електроенергії (довга лінія).

Кола, що містять тільки лінійні елементи, називаються лінійними.

Наявність в схемі хоч би одного нелінійного елементу відносить її до класу нелінійних.

1.1 Резистивний елемент (резистор)

Умовне графічне зображення резистора приведенне на рис. 1.1 а.

Резистор – це пасивний елемент, що характеризується резистивним опором. Останнє визначається геометричними розмірами тіла і властивостями матеріалу : питомим опором ρ (Ом / м). У простому випадку опір провідника завдовжки l і перерізом S визначається вираженням:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S} \text{ (Ом).}$$

Основною характеристикою резистивного елементу є залежність $u(i)$ або $i(u)$, яка називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ).

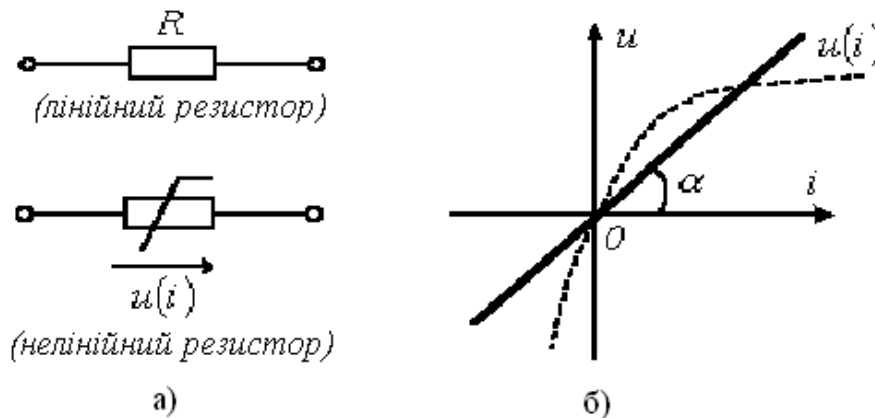


Рисунок 1.1 – Характеристика резистивного елементу:
а) умовне зображення резистора; б) зображення резисторних залежностей на графіку

Якщо залежність $u(i)$ є прямою лінією, що проходить через початок координат (рис. 1.1 б), то резистор називається лінійним і описується співвідношенням:

$$u = Ri = m_R i \operatorname{tg} \alpha.$$

Нелінійний резисторний елемент ВАХ якого нелінійна (рис. 1.1 б), характеризується декількома параметрами.

1.2 Індуктивний елемент (катушка індуктивності)

Умовне графічне зображення катушки індуктивності приведене на рис. 1.2 а. Катушка – це пасивний елемент, який характеризується індуктивністю. Для розрахунку індуктивності катушки розрахувати створене нею магнітне поле.

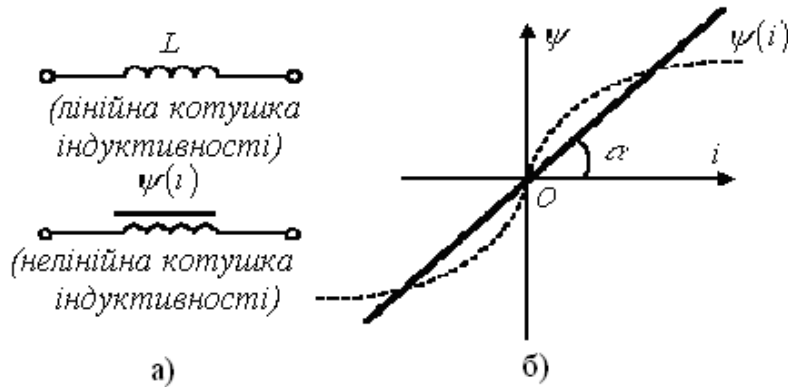


Рисунок 1.2 – Графічне зображення катушки індуктивності:
а) умовне зображення катушки індуктивності; б) зображення індуктивності катушки на графіку

Індуктивність визначається відношенням потокозчеплення до струму, що протікає по витках катушки,

$$L = \frac{\Psi}{i} (\text{Гн}).$$

У свою чергу потокозчеплення дорівнює сумі добутків потоку, що пронизує витки, на число цих витків

$$\psi = \sum W_K \Phi_K$$

де $\Phi_K = \int_{S_K} \vec{B} d\vec{S}$ магнітний потік.

Основною характеристикою катушки індуктивності є залежність $\psi(i)$, що називається вебер-амперною характеристикою. Для лінійних катушок індуктивності залежність $\psi(i)$ є прямою лінією, що проходить через початок координат (рис. 1.2 б), при цьому

$$L = m_L \tan \alpha = \text{const}.$$

1.3 Ємнісний елемент (конденсатор)

Умовне графічне зображення конденсатора приведене на рис. 1.3 а. Конденсатор – це пасивний елемент, що характеризується електричною ємністю. Для розрахунку ємності необхідно розрахувати електричне поле в конденсаторі.

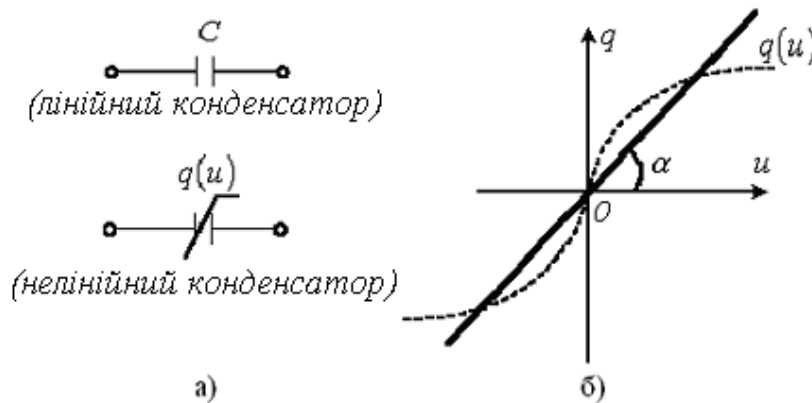


Рисунок 1.3 – Графічне зображення конденсатора:
а) умовне зображення конденсатора; б) зображення ємності конденсатора на графіку

Ємність визначається відношенням заряду q на обкладках конденсатора до напруги u між ними

$$C = \frac{q}{u}(\Phi)$$

і залежить від геометрії обкладань і властивостей діелектрика, що знаходиться між ними. Більшість діелектриків, що використовуються на практиці, лінійні, тобто у них відносна діелектрична проникність $\xi = const$. В цьому випадку залежність $q(u)$ є прямою лінією, що проходить через початок координат (рис. 1.3 б) та

$$C = m_c \operatorname{tg} \alpha = const.$$

1.4 Джерело електричної енергії

Властивості джерела електричної енергії описуються ВАХ, що називаються **зовнішньою характеристикою джерела**. Далі в цьому розділі для спрощення аналізу і математичного опису розглядатимуться джерела постійної напруги (струму). Проте усі отримані при цьому закономірності, поняття і еквівалентні схеми повною мірою поширюються

на джерела змінного струму. ВАХ джерела може бути визначена експериментально на основі схеми, представленої на рис. 1.4 а. Тут вольтметр V вимірює напругу на затисках 1-2 джерела U , а амперметр A - споживаний від нього струм I , величина якого може змінюватися за допомогою змінного резистора навантаження (реостата) R_H .

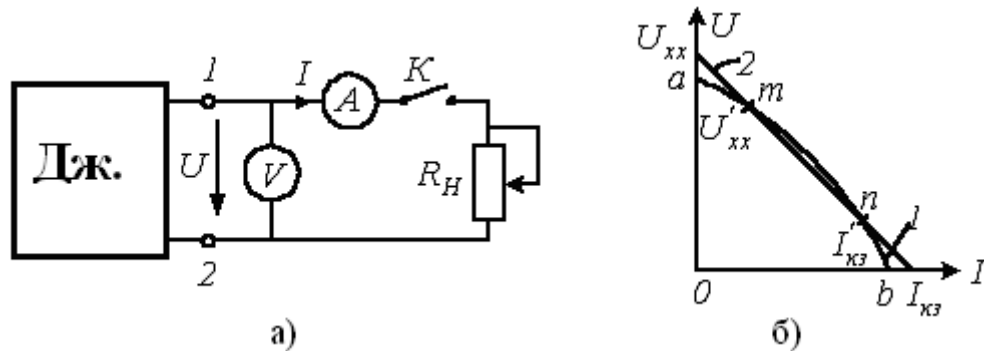


Рисунок 1.4 – Вольт-амперна характеристика джерела:
а) схема для експериментального визначення ВАХ джерела;
б) крива нелінійного ВАХ джерела

У загальному випадку ВАХ джерела є нелінійною крива 1 на рис. 4 б. Вона має дві характерні точки, які відповідають:

а - **режиму холостого ходу** $I = 0$, $U = U_{XX}$;

б - **режиму короткого замикання** $U = 0$, $I = I_{K3}$.

Для більшості джерел режим короткого замикання (іноді холостого ходу) є неприпустимим. Струми і напруга джерела зазвичай можуть змінюватися в певних межах, обмежених згори значеннями, що відповідають номінальному режиму (режиму, при якому виробник гарантує найкращі умови його експлуатації відносно економічності і довговічності терміну служби). Це дозволяє у ряді випадків для спрощення розрахунків апроксимувати нелінійну ВАХ на робочій ділянці $m-n$ (рис. 1.4, б) прямої, положення якої визначається робочими інтервалами зміни напруги і струму. Слід зазначити, що багато джерел (гальванічні елементи, акумулятори) мають лінійні ВАХ. Пряма 2 на рис. 1.4 б і описується лінійним рівнянням

$$U = U_{XX} - R_{BH} I,$$

де U_{XX} - напруга на затисках джерела при відключеному навантаженні (розімкненому ключі K в схемі на рис. 1.4а);

$$R_{BH} = U_{XX} / I_{K3} - \text{внутрішній опір джерела.}$$

Окрім відмічених режимів функціонування джерела, на практиці важливе значення має погоджений режим роботи, при якому навантаженням R_H від джерела споживається максимальна потужність. Умова такого режиму $R_{BH} = R_H$. На закінчення відмітимо, що ідеальні джерела ЕРС і струму є джерелами нескінченно великій потужності.

Контрольні запитання

1. Дати характеристику ідеального резистора і назвати реальні чинники що діють на нього.
2. Дати характеристику ідеального конденсатора і назвати реальні чинники що діють на нього.
3. Дати характеристику ідеальної котушки індуктивності і назвати реальні чинники що діють на неї.
4. Що таке зовнішня характеристика джерела?
5. Чи може зовнішня характеристик джерела проходити через початок координат?
6. Охарактеризувати ідеальне джерело струму і привести його ВАХ.
7. Охарактеризувати ідеальне джерело напруги і привести його ВАХ.
8. Який режим роботи джерела представляє практичну цінність і чому?

2 ПРЕДСТАВЛЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНИХ ВЕЛИЧИН ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕКТОРІВ І КОМПЛЕКСНИХ ЧИСЕЛ.

Нині центральне виробництво і розподіл електричної енергії здійснюється в основному на змінному струмі. Змінний струм дає можливість ефективного дроблення електричної енергії і зміни величини напруги за допомогою трансформаторів. Змінним струмом (напругою, ЕРС і так далі) називається струм (напруга, ЕРС і так далі), що змінюється в часі. Струми, значення яких повторюються через рівні проміжки часу в одній і тій же послідовності, називаються **періодичними**, а найменший проміжок часу, через який ці повторення спостерігаються, періодом T .

Для періодичного струму маємо:

$$i=F(t)=F(t+T).$$

Величина, зворотна періоду, частота вимірюється в герцах (Гц): $f=1/T$. У СНД і європейських країнах промислова частота $f=50\text{Гц}$. Миттєве значення змінної величини є функція часу. Її прийнято означати рядковою буквою:

i - миттєве значення струму $i(t)$;

u - миттєве значення напруги $u(t)$;

e - миттєве значення ЕРС $e(t)$;

p - миттєве значення потужності $p(t)$.

Найбільше миттєве значення змінної величини за період називається амплітудою (її прийнято позначати заголовною буквою з індексом m):

I_m - амплітуда струму;

U_m - амплітуда напруги;

E_m - амплітуда ЕРС;

P_m - амплітуда потужності.

Діюче значення змінного струму - значення періодичного струму, рівне такому значенню постійного струму, який за час одного періоду справить те ж саме теплове або електродинамічне враження, що і періодичний струм,

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}.$$

Аналогічно визначаються діючі значення ЕРС і напруга. З усіх можливих форм періодичних струмів найбільше поширення отримав синусоїдальний струм.

2.1 Зображення синусоїдальних ЕРС, напруги і струмів на площині в декартових координатах

Синусоїдальні струми і напругу можна зображувати графічно, записати за допомогою рівнянь з тригонометричними функціями, представити у вигляді векторів на декартовій площині, або комплексними числами. Приведеним на рис. 2.1 графіками двох синусоїдальних ЕРС e_1 і e_2 відповідають рівняння:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \Psi_{e1}); \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \Psi_{e2}).$$

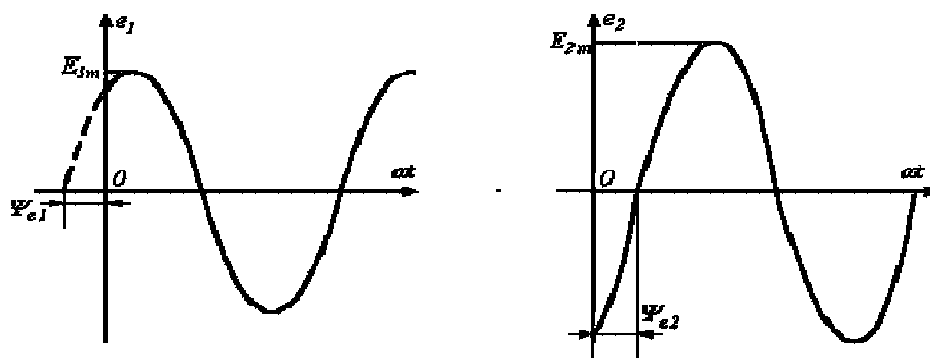


Рисунок 2.1 – Графіки синусоїдальних ЕРС

Значення аргументів синусоїдальних функцій $(\omega t + \Psi_{e1})$ і $(\omega t + \Psi_{e2})$ називаються **фазами** синусоїд, а значення фази в початковий момент часу ($t=0$): Ψ_{e1} і Ψ_{e2} - **початковою фазою** ($\Psi_{e1} > 0$; $\Psi_{e2} < 0$).

Величину ω , характеризуючи швидкість зміни фазового кута, називають **кутовою частотою**. Оскільки фазовий кут синусоїди за час одного періоду T змінюється на 2π рад., то кутова частота є

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f,$$

де f - частота.

При спільному розгляді двох синусоїдальних величин однієї частоти різницю їх фазових кутів, рівну різниці початкових фаз, називають **кутом зрушення фаз**. Для синусоїдальних ЕРС e_1 і e_2 кут зрушення фаз :

$$\omega = (\omega t + \Psi_{e1}) - (\omega t + \Psi_{e2}) = \Psi_{e1} - \Psi_{e2}.$$

2.2 Векторне зображення величин, що синусоїдально змінюються

На декартові площині з початку координат проводять вектори, рівні по модулю амплітудним значенням синусоїдальних величин, і обертають ці вектори проти годинникової стрілки з кутовою частотою, рівною ω . Фазовий кут при обертанні відлічується від позитивної півосі абсцис. Проекції векторів, що обертаються, на вісь ординат дорівнюють миттєвим значенням ЕРС e_1 і e_2 (рис. 2.2 а).

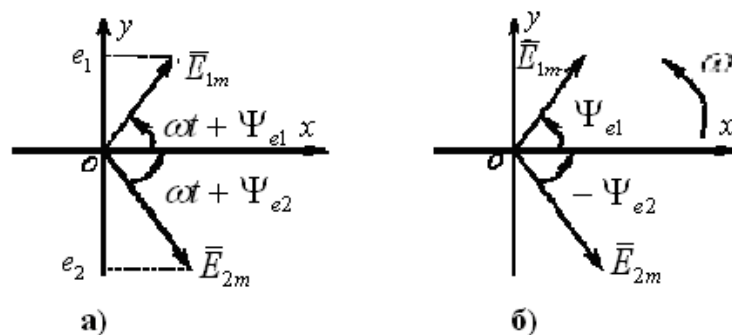


Рисунок 2.2 – Векторне зображення величин, що синусоїдально змінюються:

а) проекції векторів, що обертаються; б) нерухомі вектори

Сукупність векторів, які зображують, що синусоїдально змінюються ЕРС, напруги і струми називають **векторними діаграмами**. При побудові векторних діаграм вектори зручно розташовувати для початкового моменту часу ($t=0$), що витікає з рівності кутових частот синусоїдальних величин і еквівалентно тому, що система декартових координат сама обертається проти годинникової стрілки зі швидкістю $\dot{a} = b = jc$.

Таким чином, в цій системі координат вектори нерухомі (рис. 2.2 б). Векторні діаграми знайшли широке застосування при аналізі кіл синусоїдального струму в силу того, що складання та віднімання миттєвих значень величин можна замінити складанням і відніманням відповідних векторів.

2.3 Представлення синусоїдальних ЕРС, напруги і струмів комплексними числами

Геометричні операції з векторами можна замінити алгебраїчними операціями з комплексними числами, що істотно підвищує точність

отримуваних результатів. Кожному вектору на комплексній площині відповідає певне комплексне число, яке може бути записане в **показовій** $\dot{a} = ae^{j\Psi}$, **тригонометричній** $\dot{a} = a \cos \Psi + ja \sin \Psi$, або **алгебраїчній** $\dot{a} = b + jc$ **формах**. Наприклад, ЕРС, зображеної на рис.2.3 вектором, що обертається, відповідає комплексне число:

$$E_m e^{j(\omega t + \Psi_e)} = E_m \cos(\omega t + \Psi_e) + jE_m \sin(\omega t + \Psi_e) = e' + je.$$

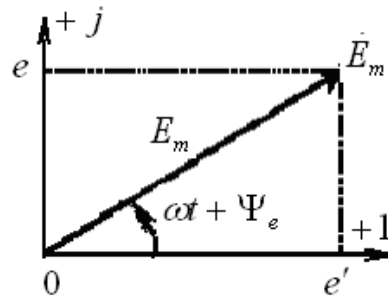


Рисунок 2.3 – ЕРС, зображена вектором, що обертається

Фазовий кут $(\omega t + \Psi_e)$ визначається по проекціях вектору на осі "+1" і "+j" системи координат, як

$$\operatorname{tg}(\omega t + \Psi_e) = \frac{e}{e'}.$$

Відповідно до тригонометричної форми запису уявна складова комплексного числа визначає миттєве значення синусоїдально змінної ЕРС:

$$e = E_m \sin(\omega t + \Psi_e) = I_m \left\{ E_m e^{j(\omega t + \Psi_e)} \right\}.$$

Комплексне число $E_m e^{j(\omega t + \Psi_e)}$ зручно представити у вигляді добутку двох комплексних чисел :

$$E_m e^{j(\omega t + \Psi_e)} = \underbrace{E_m e^{j\Psi_e}}_{E_m} \cdot e^{j\omega t} = \dot{E}_m e^{j\omega t}.$$

Параметр \dot{E}_m , відповідає положенню вектору для $t = 0$ (чи на тій, що обертається із швидкістю ω комплексної площини), називають **комплексно амплітудою**: $\dot{E}_m = E_m e^{j\Psi_e}$, а параметр $\dot{E}_m e^{j(\omega t + \Psi_e)}$ -

комплексом миттєвого значення. Параметр $e^{j\omega t}$ є оператором повороту вектору на кут ωt відносно початкового положення вектору. Взагалі кажучи, множення вектору на оператор повороту $e^{\pm j\alpha}$ є його поворот відносно первинного положення на кут $\pm\alpha$. Отже, миттєве значення синусоїдальної величини рівно уявній частині без знаку "j" добутку комплексу амплітуди і оператора повороту $e^{j\omega t}$:

$$e = E_m \sin(\omega t + \Psi_e) = I_m \{ \dot{E}_m e^{j\omega t} \}.$$

Перехід від однієї форми запису синусоїдальної величини до іншої здійснюється за допомогою формули Ейлера: $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$.

2.4 Діюче значення синусоїдальних ЕРС, напруги і струмів.

Відповідно до вираження для діючого значення синусоїдального струму запишемо:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{I_m^2 \frac{1}{T} \int \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{I_m^2 \cdot T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Аналогічний результат можна отримати для синусоїдальних ЕРС і напруги. Таким чином, діючі значення синусоїдальних струмів, ЕРС і напруга менше своїх амплітудних значень в $\sqrt{2}$ раз: $X = \frac{X_m}{\sqrt{2}}$.

До речі, номінал напруги 220В 50 Гц в освітлювальній мережі є діюче значення. При перегляді осцилограми на екрані осцилографа спостерігатиметься синусоїда періодом 20мс і амплітудою 310В.

Контрольні питання

1. Який практичний сенс має зображення синусоїдальних величин за допомогою векторів?
2. Який практичний сенс має представлення синусоїдальних величин з використанням комплексних чисел?
3. Напишіть формулу для комплексу амплітуди струму.
4. Напишіть формулу для комплексу миттєвого значення напруги.
5. Напишіть формулу для визначення модуля комплексного числа.
6. У скільки разів діюче значення синусоїдального струму (напруга) більше або менше за амплітудне?

3 ЕЛЕМЕНТИ В КОЛІ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

3.1 Резистор

Ідеальний резистивний елемент рис. 3.1 не має ні індуктивності, ні місткості.

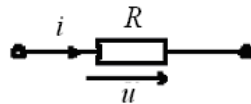


Рисунок 3.1 – Умовне зображення резистора

Якщо до нього прикласти синусоїдальну напругу

$$u = U_m \sin(\omega t + \Psi),$$

то струм i через нього буде рівний

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \Psi) = I_m \sin(\omega t + \Psi).$$

Це співвідношення показує, що струм має ту ж початкову фазу, що і напруга. Таким чином, якщо на вході двопроменевого осцилографа подати сигнали u і i , то синусоїди, що відповідають їм, на його екрані проходитимуть (рис. 3.2) через нуль одночасно, тобто **на резисторі напруга і струм співпадають по фазі**.

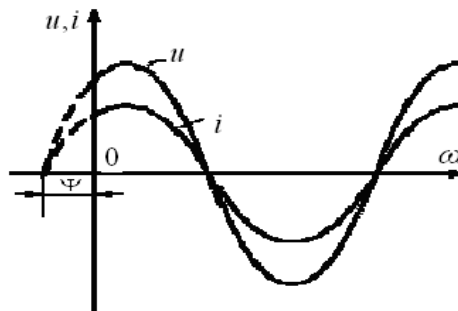


Рисунок 3.2 – Синусоїди напруги і струму

Відповідно $U_m = RI_m$, $U = RI$. Переходячи від синусоїдальних функцій напруги і струму до комплексів, що відповідають їм:

$$u = U_m \sin(\omega t + \Psi) \Rightarrow \dot{U} = Ue^{j\Psi},$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi) \Rightarrow \dot{I} = Ie^{j\Psi},$$

ділячи перший з них на другий:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\Psi}}{Ie^{j\Psi}} = \frac{U}{I} = R \text{ чи } \dot{U} = R\dot{I}.$$

Отриманий результат показує, що відношення двох комплексів є речова константа. Отже, вектори напруги і струму (рис. 3.3), що відповідають їм, співпадають по напрямку.

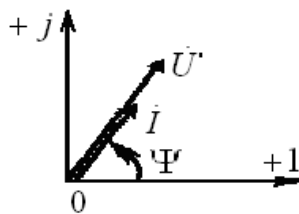


Рисунок 3.3 – Вектори напруги і струму

3.2 Конденсатор

Ідеальний ємнісний елемент (рис.3.4) не має активного опору.

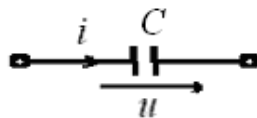


Рисунок 3.4 – Умовне зображення конденсатора

Якщо до нього прикласти синусоїдальну напругу $u = U_m \sin(\omega t + \Psi)$ (рис. 3.4), то струм i через нього буде дорівнювати:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(Cu) = C \frac{du}{dt} = \omega C U_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Отриманий результат показує, що **напруга на конденсаторі відстає по фазі від струму на $\frac{\pi}{2}$** . Таким чином, якщо на входи двохпроменевого осцилографа подати сигнали u і i , то на його екрані отримаємо картинку, приведену на рис. 3.5.

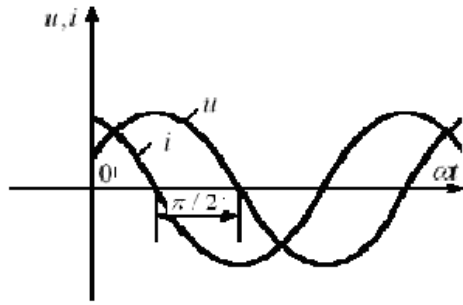


Рисунок 3.5 – Синусоїди напруги і струму конденсатора

Можна показати, що: $U_m = \frac{1}{\omega C} I_m = X_C I_m$, $U = \frac{1}{\omega C} I = X_C I$.

Введений параметр $X_C = \frac{1}{\omega C}$ називають **реактивним ємнісним опором конденсатора**. Як і резисторний опір, X_C має розмірність Ом. Але на відміну від R даний параметр є функцією частоти, що показано на рис. 3.6.

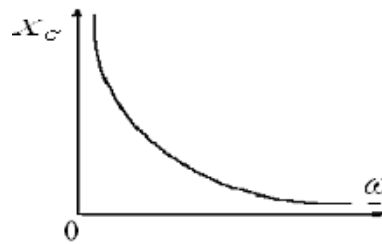


Рисунок 3.6 – Графічне зображення реактивної ємності опору конденсатора

З рис. 3.5 витікає, що при $f = 0$ конденсатор представляє розрив для струму, а при $f \rightarrow \infty$ $X_C = 0$. Переходячи від синусоїдних функцій напруги і струму до комплексів, що відповідають їм:

$$u = U_m \sin(\omega t + \Psi) \Rightarrow \dot{U} = U e^{j\Psi},$$

$$i = I_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow \dot{I} = I e^{j\left(\Psi + \frac{\pi}{2}\right)},$$

розділимо перший з них на другий:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\Psi}}{Ie^{j\left(\Psi+\frac{\pi}{2}\right)}} = \frac{Ue^{j\Psi}}{Ie^{j\Psi}e^{j\frac{\pi}{2}}} = X_C e^{-j\frac{\pi}{2}} = -jX_C = \underline{Z}_C,$$

або

$$\dot{U} = -jX_C \dot{I} = \underline{Z}_C \dot{I}.$$

В останньому співвідношенні $\underline{Z}_C = -jX_C$ - комплексний опір конденсатора. Множення на $-j = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ відповідає повороту вектора на кут $\frac{\pi}{2}$ за годинниковою стрілкою. Що видно на векторній діаграмі, представлений на рис. 3.7.

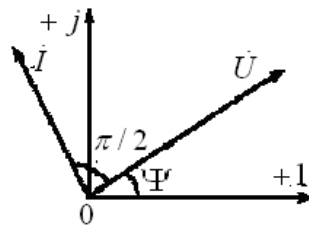


Рисунок 3.7 – Векторна діаграма опору конденсатора

3.3 Котушка індуктивності

Ідеальний індуктивний елемент немає активного опору рис.3.8.

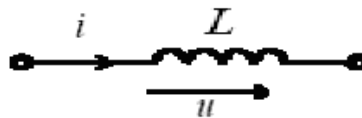


Рисунок 3.8 – Умовне зображення котушки індуктивності

Нехай струм, що протікає через нього (рис. 3.8), визначається вираженням:

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi).$$

Тоді для напруги на затисках котушки індуктивності можна записати

$$u = -e = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt}(Li) = \omega LI_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Отриманий результат показує, що **напруга на котушці індуктивності випереджає по фазі струм на $\frac{\pi}{2}$** .

Таким чином, якщо на входи двопроменевого осцилографа подати сигнали u і i , то на його екрані (ідеальний індуктивний елемент) отримаємо картинку, що відповідає рис. 3.9.

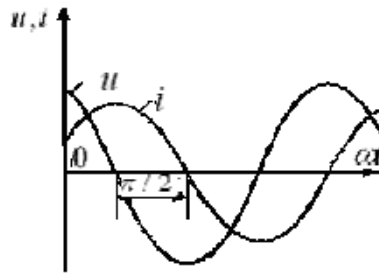


Рисунок 3.9 – Синусоїди напруги і струму котушки індуктивності

Можна показати, що $U_m = \omega L I_m = X_L I_m$; $U = \omega L I = X_L I$. Введений параметр $X_L = \omega L$ називають **реактивним індуктивним опором котушки**, його розмірність - Ом. Як і у ємнісного елементу цей параметр є функцією частоти. Проте в даному випадку ця залежність має лінійний характер, що ілюструє рис. 3.10.

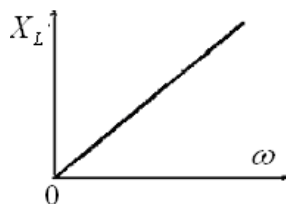


Рисунок 3.10 – Векторна діаграма реактивного індуктивного опору котушки

З рис. 3.10 витікає, що при $f = 0$ котушка індуктивності не чинить опору струму, що протікає через нього, і при $f \rightarrow \infty$ $X_L \rightarrow \infty$. Переходячи від синусоїдальних функцій напруги і струму до тих, що відповідають комплексам:

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow \dot{U} = U e^{j\left(\Psi + \frac{\pi}{2}\right)},$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi) \Rightarrow \dot{I} = I e^{j\Psi},$$

розділимо перший з них на другий:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U e^{j\left(\Psi + \frac{\pi}{2}\right)}}{I e^{j\Psi}} = \frac{U e^{j\Psi} e^{j\frac{\pi}{2}}}{I e^{j\Psi}} = X_L e^{j\frac{\pi}{2}} = jX_L = \underline{Z}_L,$$

або

$$\dot{U} = -jX_L \dot{I} = \underline{Z}_L \dot{I}.$$

У отриманому співвідношенні $\underline{Z}_L = jX_L$ - комплексний опір котушки індуктивності. Множення на $j = e^{j\frac{\pi}{2}}$ відповідає повороту вектору на кут $\frac{\pi}{2}$ проти годинникової стрілки, що показує векторна діаграма, представлена на рис. 3.11.

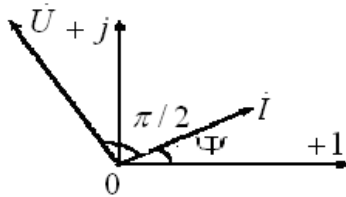


Рисунок 3.11 – Векторна діаграма комплексного опору котушки

3.4 Послідовне з'єднання резистивного і індуктивного елементів

Нехай в гілці на рис. 3.12 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$. тоді

$$\begin{aligned} u &= u_R + u_L = RI_m \sin(\omega t + \varphi) + \omega LI_m \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} I_m \sin\left(\omega t + \varphi + \arctg \frac{\omega L}{R}\right) = \\ &= U_m \sin(\omega t + \varphi + \Psi) \end{aligned}$$

$$\text{де } U_m = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} I_m = Z I_m, \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad \Psi = \arctg \frac{\omega L}{R},$$

причому межі зміни $\Psi : 0 < \Psi < \frac{\pi}{2}$.

Цьому рівнянню можна поставити у відповідність співвідношення:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L = R\dot{I} + jX_L\dot{I} = (R + jX_L)\dot{I} = \underline{Z}\dot{I},$$

якому, у свою чергу, відповідає векторна діаграма на рис. 3.13.

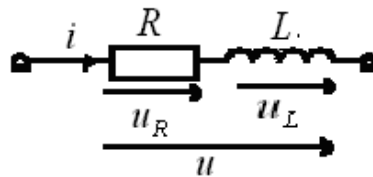


Рисунок 3.12 – Умовне зображення послідовного з'єднання резистивного і індуктивного елементів

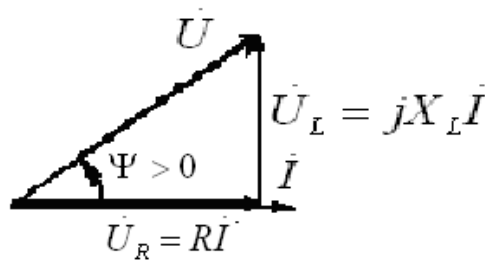


Рисунок 3.13 – Векторна діаграма трикутника напруги

Вектори на рис. 3.13 утворюють фігуру, що **називається трикутником напруги**. Аналогічне вираження

$$\underline{Z} = R + jX_L = \sqrt{R^2 + X_L^2} e^{j\Psi} = Ze^{j\Psi}$$

графічно може бути представлено **трикутником опорів** (рис. 3.14), який подібний до трикутника напруги.

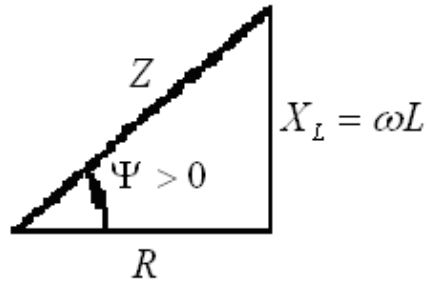


Рисунок 3.14 – Графічне зображення трикутника опорів

3.5 Паралельне з'єднання резистивного і ємнісного елементів

Для кола на рис. 3.15 мають місце співвідношення:

$$U = U_R = U_C,$$

$$I_R = \frac{U_R}{R} = gU,$$

де $i = I_m \sin(\omega t + \Psi) \Rightarrow \dot{I} = I e^{j\Psi}$ [См] - активна провідність;

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} = b_C U,$$

де $b_C = \frac{1}{X_C}$ [См] - реактивна провідність конденсатора.

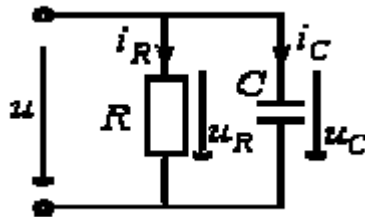


Рисунок 3.15 – Схема паралельного з'єднання резистивного і ємнісного елементів

Векторна діаграма струмів для цього кола, що називається трикутником струмів, приведена на рис. 3.16.

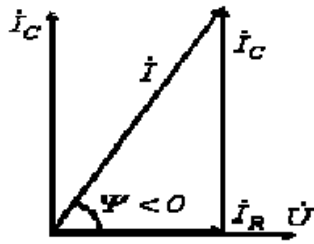


Рисунок 3.16 – Векторна діаграма струмів

Їй відповідає рівняння в комплексній формі

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_C = g\dot{U} + jb_C\dot{U} = (g + jb_C)\dot{U} = \underline{Y}\dot{U} = Ie^{-j\Psi},$$

де $I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2},$

$$\underline{Y} = g + jb_C = \frac{1}{R} + j\omega C = Ye^{-j\Psi} - \text{комплексна провідність};$$

$$\Psi = -\arctg \frac{b_C}{g} = -\arctg \omega CR.$$

Трикутник провідності, подібний до трикутника струмів, приведений на рис. 3.17.

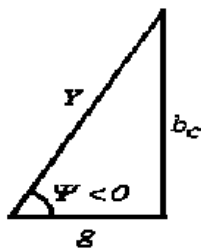


Рисунок 3.16 – Трикутник провідності

Контрольні питання

1. У чому суть реактивних опорів?
2. Яке фазове співвідношення напруги і струму у конденсатора?
3. Яке фазове співвідношення напруги і струму у індуктивності?
4. Що показує трикутник опорів?
5. Що показує трикутник напруги?
6. Чим відрізняються трикутники напруги і струму для однакового

кола?
7. Чому котушки індуктивності і конденсатори не використовуються в колах постійного струму?

4 ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ. МИТТЄВА, АКТИВНА, РЕАКТИВНА І ПОВНА ПОТУЖНІСТЬ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

Передача енергії w по електричному колі (наприклад, по лінії електропередачі), розсіювання енергії, тобто перехід електромагнітної енергії в теплову, а також і інші види перетворення енергії, характеризуються інтенсивністю, з якою протікає процес, тобто тим, скільки енергії передається по лінії в одиницю часу, скільки енергії розсіюється в одиницю часу. Інтенсивність передачі або перетворення енергії називається потужністю і позначається - p . Сказаному відповідає математичне визначення:

$$p = \frac{dw}{dt}.$$

Вираження для миттєвого значення потужності в електричних колах має вигляд: $p = ui$. Приймаючи початкову фазу напруги за нуль, а зрушення фаз між напругою і струмом за $-\varphi$, отримаємо:

$$\begin{aligned} p = ui &= U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} [\cos(2\omega t - \varphi)] = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

Отже, миттєва потужність має постійну і гармонійну складову кутової частоти напруги і струму. Коли миттєва потужність негативна, а це означає що енергія повертається. рис.4.1 тобто коли напрями напруги і струму в двополюснику протилежні, енергія повертається з двополюсника джерелу живлення.

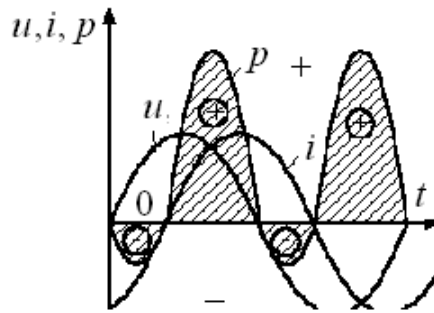


Рисунок 4.1 – Синусоїди миттєвої потужності

Таке повернення енергії джерелу відбувається за рахунок того, що енергія періодично запасається в магнітних і електричних полях відповідно індуктивних і ємнісних елементів, що входять до складу двополюсника. Енергія, що віддається джерелом двополюсником плин часу t рівна $\int_0^t p dt$.

Середнє за період значення миттєвої потужності називається **активною потужністю**.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt (Bm).$$

Зважаючи, що $\int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt = 0$, отримаємо: $P = UI \cos \varphi$.

Активна потужність, споживана пасивним двополюсником, не може бути негативною (інакше двополюсник генеруватиме енергію), тому $\cos \varphi \geq 0$, тобто на вході пасивного двополюсника $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$.

Випадок $P = 0$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$ теоретично можливий для двополюсника, що не має активних опорів, а що містить тільки ідеальні індуктивні і ємнісні елементи.

4.1 Резистор (ідеальний активний опір)

В даному випадку напруга та струм (рис. 4.2) співпадають по фазі $\varphi = 0$, тому потужність $p = ui$ завжди позитивна, тобто резистор споживає активну потужність:

$$P = UI \cos \varphi = |\cos 0 = 1| = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

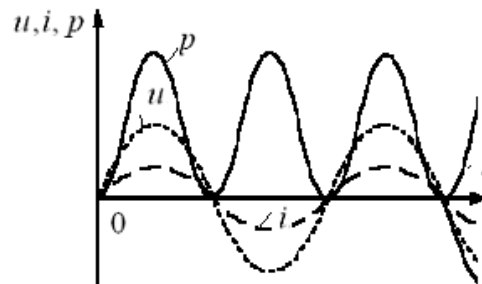


Рисунок 4.2 – Синусоїди резистора (ідеального активного опору)

4.2 Котушка індуктивності (ідеальна індуктивність)

При ідеальній індуктивності струм відстає від напруги (рис.4.3) по фазі на $\frac{\pi}{2}$. Тому у відповідності можна записати:

$$P = U_L I_L \cos \frac{\pi}{2} - U_L I_L \cos \left(2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -U_L I_L \sin 2\omega t.$$

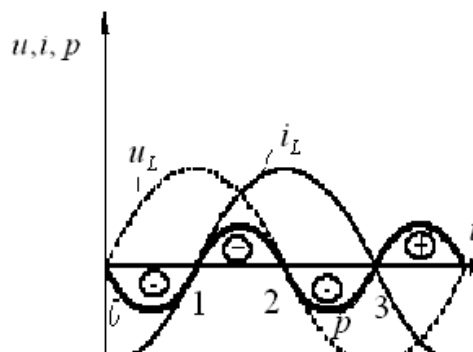


Рисунок 4.3 – Синусоїди котушки індуктивності (ідеальна індуктивність)

Ділянка 1-2: енергія $\frac{Li^2}{2}$, запасється в магнітному полі котушки, наростає. Ділянка 2-3: енергія магнітного поля убиває, повертаючись в джерело.

4.3 Конденсатор (ідеальна ємність)

Аналогічний характер мають процеси і для ідеальної місткості. Тут $\varphi = -\frac{\pi}{2}$. Тому $p = U_C I_C \sin 2\omega t$. Таким чином, в котушці індуктивності і конденсаторі активна потужність не споживається $P = 0$, оскільки в них не відбувається безповоротного перетворення енергії в інші види енергії. Тут відбувається тільки циркуляція енергії: електрична енергія запасається в магнітному полі котушки або електричному полі конденсатора упродовж чверті періоду, а упродовж наступної чверті періоду енергія знову повертається в мережу. В силу цього котушку індуктивності і конденсатор називають реактивними елементами, а їх опори X_L і X_C , на відміну від активного опору R резистора, - реактивними.

Інтенсивність обміну енергії прийнято характеризувати найбільшим значенням швидкості вступу енергії в магнітне поле котушки або електричне поле конденсатора, яке називається **реактивною потужністю**. У загальному випадку вираження для реактивної потужності має вигляд:

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Вона позитивна при відстаючому струмі (індуктивне навантаження – $\varphi > 0$) і негативна при випереджаючому струмі (ємнісне навантаження – $\varphi < 0$). Одиницю потужності в застосуванні до виміру реактивної потужності називають **вольт-ампер реактивний** (Var).

4.4 Повна потужність

Окрім понять активної і реактивної потужностей в електротехніці широко використовується поняття **повної потужності**: $S = UI$ (ВА).

Активна, реактивна і повна потужності пов'язані наступним співвідношенням: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$. Відношення активної потужності до повної називають **коефіцієнтом потужності**. З приведених вище співвідношень видно, що коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ дорівнює косинусу кута зрушення між струмом і напругою.

$$\text{Отже } \cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

Контрольні питання

1. Що таке активна потужність?

2. Що таке реактивна потужність, з якими елементами вона пов'язана?
3. Що таке повна потужність?
4. Що показує трикутник потужностей?
5. Чому необхідно прагнути до підвищення коефіцієнта потужності?

5 РЕЗОНАНСИ В КОЛАХ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

Резонансом називається такий режим роботи кола, що включає індуктивні і ємнісні елементи, при якому її вхідний опір (вхідна провідність) реальний. Наслідком цього є збіг по фазі струму на вході кола з вхідною напругою.

5.1 Резонанс в колі з послідовно з'єднаними елементами (резонанс напруги)

Для ланцюга на рис.5.1 має місце

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I} \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] = \dot{I} \underline{Z},$$

$$\text{де } \varphi = \arctg \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}; \quad \underline{Z} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} e^{j\varphi}.$$

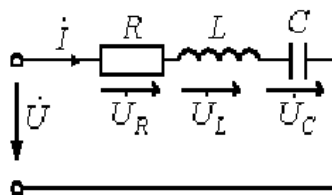


Рисунок 5.1 – Схема послідовного з'єднання елементів (резонанс напруги)

Залежно від співвідношення величин ωL і $1/(\omega C)$ можливі три різні випадки.

1. У ланцюзі переважає індуктивність, тобто $\omega L > 1/(\omega C)$, а отже $\dot{U}_L > \dot{U}_C$. Цьому режиму відповідає векторна діаграма на рис. 5.2 а.

2. У колі переважає ємність, тобто $\omega L < 1/(\omega C)$, тобто $\dot{U}_L < \dot{U}_C$. Цей випадок відбиває векторна діаграма на рис. 5.2 б.

3. $\dot{U}_L = \dot{U}_C$ - випадок резонансу напруги (рис. 5.2 в).

Умова резонансу напруги $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. При цьому $\underline{Z} = R$; $\varphi = 0$.

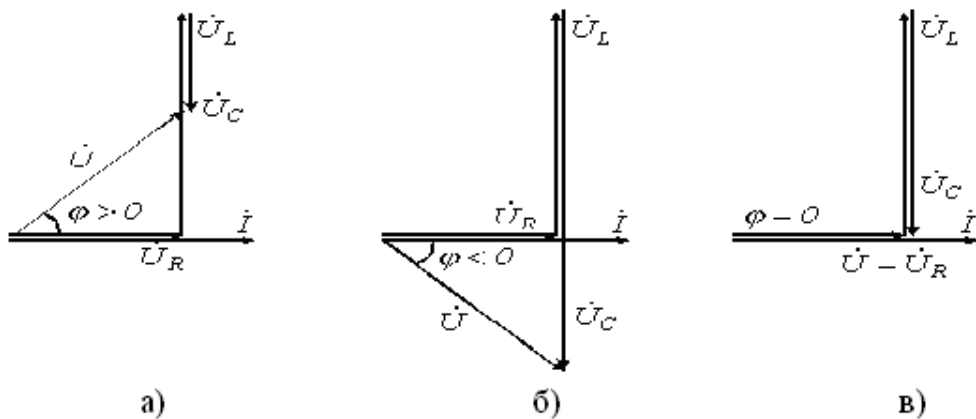


Рисунок 5.2 – Векторні діаграми резонансу напруги

При резонансі напруги або режимах, близьких до нього, струм в колі різко зростає. У теоретичному випадку при $R = 0$ його величина прагне до нескінченності. Відповідно до зростання струму збільшується напруга на індуктивному і ємнісному елементах, які можуть у багато разів перевищити величину напруги джерела живлення.

Нехай, наприклад, в колі на рис. 5.1 $U = 10$ В; $R = 1$ Ом; $X_L = 1000$ Ом.

Тоді $I = U / Z = U / R = 10$ А і, відповідно $U_L = U_C + IX_L = IX_C = 10^4$ В.

Явище резонансу знаходить корисне застосування на практиці, зокрема в радіотехніці. Проте, якщо він виникає стихійно, то може привести до аварійних режимів внаслідок появи великих перенапружень і надструмів. Фізична суть резонансу полягає в періодичному обміні енергією між магнітним полем котушки індуктивності і електричним полем конденсатора, причому сума енергій полів залишається постійною. Як показує аналіз, режиму резонансу можна добитися шляхом зміни параметрів L і C , а також частоти.

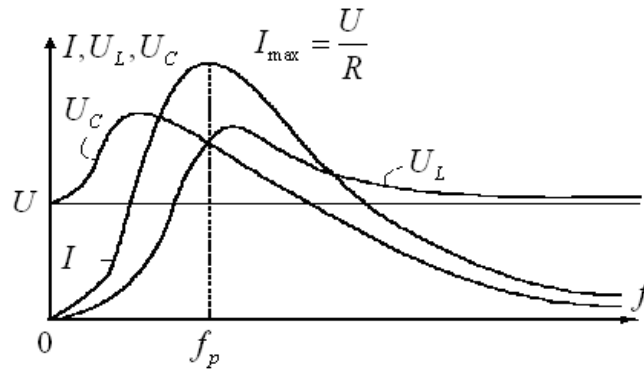


Рисунок 5.3 – Резонансні криві залежності струму

Переходячи від кругової частоти для резонансної частоти можна записати $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Резонансними кривими називаються залежності струму і напруги від частоти. В якості їх прикладу на рис. 5.3 приведені типові криві $I(f)$; I і $U_C(f)$ для кола на рис. 5.1 при $U = const$.

5.2 Резонанс в колі з паралельно з'єднаними елементами (резонанс струмів)

Для кола рис. 5.4 маємо:

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C = \dot{U} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right) = \dot{U} [g + j(b_C - b_L)] = \dot{U} \underline{Y},$$

$$\text{де } \underline{Y} = \sqrt{g^2 + (b_C - b_L)^2} e^{-j\varphi}; \quad \varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g}.$$

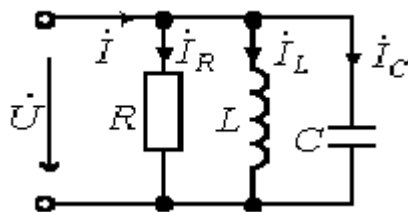


Рисунок 5.4 – Схема паралельного з'єднання елементів (резонанс струмів)

Залежно від співвідношення величин b_L і b_C , як і в розглянутому вище випадку послідовного з'єднання елементів, можливі три різні випадки.

У колі переважає індуктивність, тобто $b_L > b_C$, а отже $I_L > I_C$. Цьому режиму відповідає векторна діаграма на рис. 5.5 а. У колі переважає місткість, тобто $b_L < b_C$, тобто $I_L < I_C$. Цей випадок ілюструє векторна діаграма на рис. 5.5 б.

$I_L = I_C$ - випадок резонансу струмів (рис 5.5 в).

Умова резонансу струмів $b_L = b_C$ або $\frac{1}{\omega L} = \omega C$. При цьому $\underline{Y} = g = 1/R$, $\varphi = 0$.

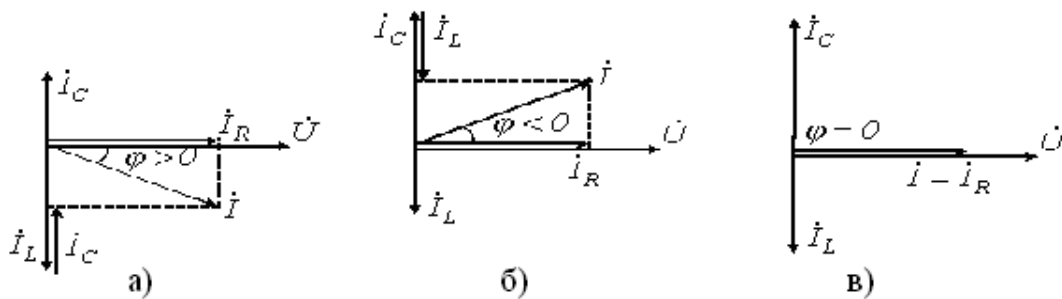


Рисунок 5.5 – Векторні діаграми резонансу струмів

Таким чином, при резонансі струмів вхідна провідність кола мінімальна, а вхідний опір, навпаки, максимальний. Зокрема за відсутності в колі на рис. 5.4 резистори R її вхідний опір в режимі резонансу прагне до нескінченності, тобто при резонансі струмів струм на вході кола мінімальний. Ідентичність умов при визначенні величини резонансної частоти вказує, що в обох випадках резонансна частота визначається одним і тим же співвідношенням.

Контрольні питання

1. Що таке резонанс напруги, чим він характеризується?
2. Що таке резонанс струмів, чим він характеризується?
3. У чому фізична суть резонансних режимів?
4. Яке практичне застосування знаходить явище резонансу?
5. Яка шкідлива дія може робити резонанс?

6 ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

6.1 Загальних відомостей про багатофазні системи

Трифазне коло є часткою випадком багатофазних електричних систем, що є сукупністю електричних кіл, в яких діють ЕРС однакової частоти, зрушені по фазі один відносно одного на певний кут. Кожну з частин багатофазної системи, що характеризується однаковим струмом, називають **фазою**, тобто фаза - це ділянка кола, що відноситься до відповідної обмотки генератора або трансформатора, лінії і навантаження. Таким чином, поняття "фаза" має в електротехніці два різні значення:

- фаза як аргумент величини, що синусоїдально змінюється;
- фаза як складова частина багатофазної електричної системи.

Джерелом трифазної напруги є трифазний генератор, на статорі якого (рис. 6.1) розміщена трифазна обмотка. Фази цієї обмотки розташовуються так, щоб їх магнітні осі були зрушені в просторі один відносно одного на $2\pi/3$ ел. рад. На рис. 6.1 кожна фаза статора умовно показана у вигляді одного витка. Початок обмоток прийнято позначати заголовними буквами *A, B, C*, а кінці - відповідно прописними *x, y, z*. ЕРС в нерухомих обмотках статора індукуються в результаті перетину їх витків магнітним полем, що створюється струмом обмотки збудження ротора на рис. 6.1, ротор умовно зображений у вигляді постійного магніту, що використовується на практиці при відносно невеликих потужностях, що обертається. При обертанні ротора з рівномірною швидкістю в обмотках фаз статора індукуються періодично зміні синусоїдальні ЕРС однакової частоти і амплітуди, але що відрізняються внаслідок просторового зрушення один від одного по фазі на $2\pi/3$ рад. (рис. 6.2).

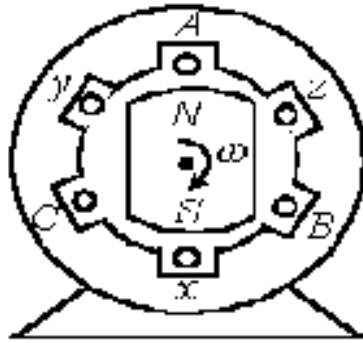


Рисунок 6.1 – Трифазний генератор

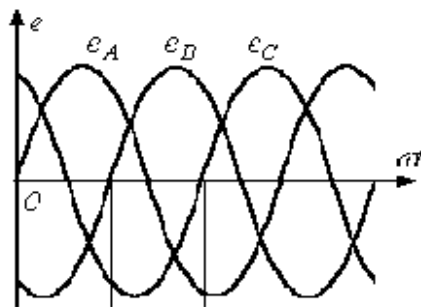


Рисунок 6.2 – Періодично зміні синусоїдальні ЕРС

Трифазні системи нині отримали найбільше поширення. На трифазному струмі працюють усі великі електростанції і споживачі, що пов'язано з рядом переваг трифазних ланцюгів перед однофазними, найважливішими з яких являються:

- економічність передачі електроенергії на великі відстані;
- можливість отримання за допомогою нерухомих обмоток магнітного поля, що обертається, на чому ґрунтована робота синхронного і асинхронного двигунів, а також ряду інших електротехнічних пристроїв.

6.2 Схем з'єднання трифазних систем

Трифазний генератор (трансформатор) має три вихідні обмотки, однакові по числу витків, але що розвивають ЕРС, зрушені по фазі на 120° . Можна було б використати систему, в якій фази обмотки генератора не були б гальванічно з'єднані один з одним. Це так звана **незв'язна система**. В цьому випадку кожену фазу генератора необхідно з'єднувати з приймачем двома дротами, тобто матиме місце шестидротяна лінія, що

неекономічно. В зв'язку з цим подібні системи не отримали широкого застосування на практиці.

Для зменшення кількості дротів в лінії фази генератора гальванічно зв'язують між собою. Розрізняють два види з'єднань : в **зірку** і в **трикутник**. У свою чергу при з'єднанні в зірку система може бути **трьох - і чотирипровідною**.

6.3 З'єднання в зірку

На рис. 6.3 приведена трифазна система при з'єднанні фаз генератора і навантаження в зірку. Тут дроти AA' , BB' і CC' - лінійні дроти.

Лінійним називається дріт, що сполучає начала фаз обмотки генератора і приймача. Точка, в якій кінці фаз з'єднуються в загальний вузол, називається **нейтральною** (на рис. 6.3 N і N' - відповідно нейтральні точки генератора і навантаження). Дріт, що сполучає нейтральні точки генератора і приймача, називається **нейтральним** (на рис. 6.3 показаний пунктиром). Трифазна система при з'єднанні в зірку без нейтрального дроту називається **трипровідною**, з нейтральним дротом - **чотирипровідною**.

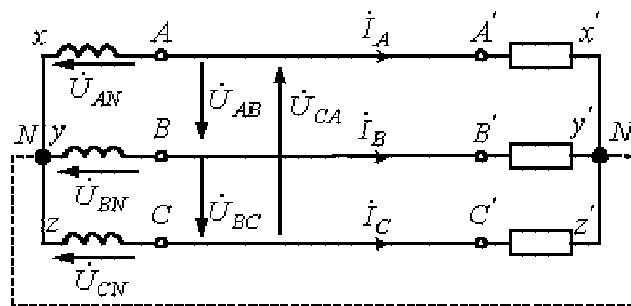


Рисунок 6.3 – Схема трифазної системи при з'єднанні фаз генератора і навантаження в зірку

Усі величини, що відносяться до фаз, носять назву **фазних змінних**, до лінії - **лінійних**. Як видно з схеми на рис. 6.3 мал., при з'єднанні в зірку лінійні струми I_A , I_B і I_C дорівнюють відповідним фазним струмам. За наявності нейтрального дроту струм в нейтральному дроті $I_{N'N} = I_A + I_B + I_C$. Якщо система фазних струмів симетрична, то $I_{N'N} = 0$.

Отже, якби симетрія струмів була гарантована, то нейтральний дріт був би не потрібний. Як буде показано далі, нейтральний дріт забезпечує підтримку симетрії напруги на навантаженні при не симетрії самого навантаження. Оскільки напруга на джерелі протилежна напрямку його ЕРС, фазна напруга генератора (рис.6.3) діє від точок A , B і C до нейтральної точки N ; $U_{A'N'}$, $U_{B'N'}$, $U_{C'N'}$ - фазна напруга навантаження.

Лінійна напруга діє між лінійними дротами. Відповідно до другого закону Кірхгофа для лінійної напруги можна записати:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{BN},$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN},$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN}.$$

Відмітимо, що завжди $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$ - як сума напруги по замкнутому контуру.

На рис. 6.4 представлена векторна діаграма для симетричної системи напруги. Як показує її аналіз (промені фазної напруги утворюють сторони рівнобедрених трикутників з кутами при основі, рівними 30°), в цьому випадку $U = \sqrt{3}U_\phi$

Зазвичай при розрахунках приймається $\dot{U}_{AN} = U_\phi e^{j0} = U_\phi$. Тоді для випадку **прямого чергування фаз**, $\dot{U}_{BN} = U_\phi e^{-j120^\circ}$,

$\dot{U}_{CN} = U_\phi e^{-j240^\circ} = U_\phi e^{j120^\circ}$ (при **зворотному чергуванні фаз** фазові зрушення у \dot{U}_{BN} і \dot{U}_{CN} міняються місцями).

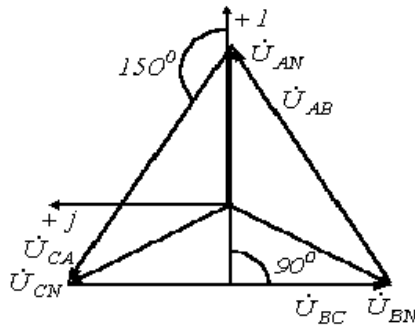


Рисунок 6.4 – Векторна діаграма для симетричної системи напруги

При симетрії комплекси лінійної напруги легко визначаються безпосередньо з векторної діаграми на рис.6.4. Направляючи речову вісь системи координат по вектору \dot{U}_{AN} (його початкова фаза дорівнює нулю), відлічуємо фазові зрушення лінійної напруги по відношенню до цієї осі. Так для лінійної напруги \dot{U}_{BC} і \dot{U}_{CA} отримуємо: $\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}U_\phi e^{-j90^\circ}$; $\dot{U}_{CA} = \sqrt{3}U_\phi e^{j150^\circ}$.

6.4 З'єднання в трикутник

У зв'язку з тим, що значна частина приймачів, що включаються в трифазні кола, буває несиметричною, дуже важлива на практиці, наприклад, в схемах з освітлювальними приладами, забезпечувати незалежність режимів роботи окремих фаз.

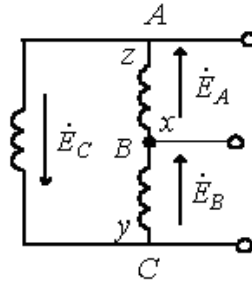


Рисунок 6.5 – Схема трипровідного кола при з'єднанні фаз приймача в трикутник

Окрім чотирипровідної, подібні властивості мають і трипровідні кола при з'єднанні фаз приймача в трикутник. Але в трикутник також можна з'єднати і фази генератора (рис. 6.5).

Для симетричної системи ЕРС маємо:

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

Таким чином, за відсутності навантаження у фазах генератора в схемі на рис.6.5 струмів дорівнюватимуть нулю. Проте, якщо поміняти місцями почало і кінець будь-якої з фаз, то $\sum \dot{E}_A \neq 0$ і в трикутнику протікатиме струм короткого замикання. Отже, для трикутника треба строго дотримуватися порядку з'єднання фаз: початок однієї фази з'єднується з кінцем інший.

Схема з'єднання фаз генератора і приймача в трикутник представлена на рис 6.6. Очевидно, що при з'єднанні в трикутник лінійна напруга рівна відповідним фазним.

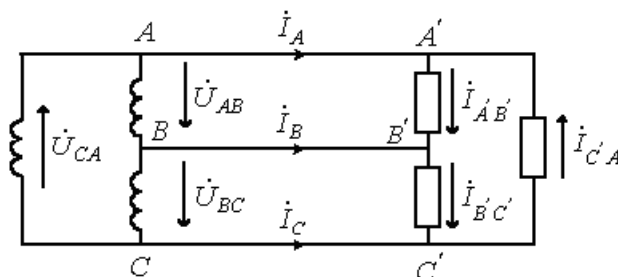


Рисунок 6.6 – Схема з'єднання фаз генератора і приймача в трикутник

За першим законом Кірхгофа зв'язок між лінійними і фазними струмами приймача визначається співвідношеннями:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'} ,$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'} ,$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'} .$$

Аналогічно можна виразити лінійні струми через фазні струми генератора.

На рис. 6.7 представлена векторна діаграма симетричної системи лінійних і фазних струмів.

Її аналіз показує, що при симетрії струмів $I_n = \sqrt{3}I_\phi$.

На закінчення відмітимо, що окрім розглянутих з'єднань "зірка - зірка" і "трикутник - трикутник" на практиці також застосовуються схеми "зірка - трикутник" і "трикутник - зірка".

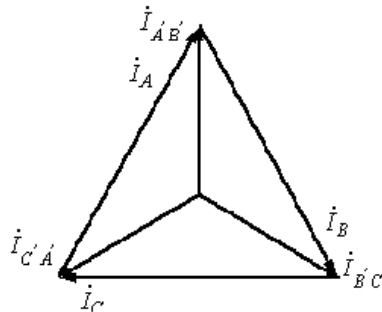


Рисунок 6.7 – Векторна діаграма симетричної системи лінійних і фазних струмів

Контрольні питання

1. Який принцип дії у трифазного генератора?
2. Зображуйте епюру трифазної симетричної напруги.
3. У чому полягають основні переваги трифазних систем?
4. Які існують схеми з'єднання в трифазних системах?
5. Які співвідношення між фазними і лінійними величинами мають місце при з'єднанні в зірку?

6. Які співвідношення між фазними і лінійними величинами мають місце при з'єднанні в трикутник?
7. У яких випадках доцільно використати схему з'єднання в зірку?
8. У яких випадках доцільно використати схему з'єднання в трикутник?

7 МАГНІТНЕ ПОЛЕ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ

Однією з найважливіших переваг багатофазних систем є отримання магнітного поля, що обертається, за допомогою нерухомих котушок, на чому ґрунтована робота двигунів змінного струму. Розгляд цього питання розпочнемо з аналізу магнітного поля котушки з синусоїдальним струмом.

7.1 Магнітне поле котушки з синусоїдальним струмом

При пропусканні по обмотці котушки синусоїдального струму вона створює магнітне поле (рис. 7.1), вектор індукції якого змінюється (пульсує) уздовж цієї котушки також за синусоїдальним законом. Миттєва орієнтація вектору магнітної індукції в просторі залежить від намотування котушки і миттєвого напрямку струму в ній і визначається за правилом правого буравчика. Так для випадку, показаного на рис. 7.1, вектор магнітної індукції спрямований по осі котушки вгору. Через півперіоду, коли при тому ж модулі струм змінить свій знак на протилежний, вектор магнітної індукції при тій же абсолютній величині поміняє свою орієнтацію в просторі на 180^0 . З урахуванням вищесказаного магнітне поле котушки з синусоїдальним струмом називають **пульсуючим**.

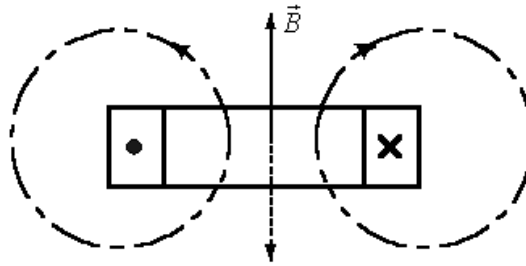


Рисунок 7.1 – Магнітне поле котушки зі струмом

7.2 Колове магнітне поле, що обертається, двох - і трифазної обмоток

Круговим магнітним полем, що обертається, називається поле, вектор магнітної індукції якого, не змінюючись по модулю, обертається в просторі з постійною кутовою частотою. Для створення кругового поля, що обертається, потрібне виконання двох умов :

1. Осі котушок мають бути зрушені в просторі один відносно одного на певний кут (для двофазної системи - на 90° , для трифазної - на 120°).
2. Струми, що живлять котушки, мають бути зрушені по фазі відповідно до просторового зміщення котушок.

Розглянемо отримання кругового магнітного поля, що обертається, у разі двофазної системи Тесла (рис. 7.2 а).

При пропусканні через котушки гармонійних струмів кожна з них відповідно до вищесказаного створюватиме пульсуюче магнітне поле. Вектори \vec{B}_A і \vec{B}_B , характеризуючі ці поля, спрямовані уздовж осей відповідних котушок, а їх амплітуди змінюються також за гармонійним законом. Якщо струм в котушці B відстає від струму в котушці A на 90° (рис. 7.2 б), то $B_A = B_m \sin \omega t$; $B_B = B_m \sin(\omega t - 90^\circ)$.

Знайдемо проекції результуючого вектору магнітної індукції \vec{B} на осі x і y декартової системи координат, пов'язаної з осями котушок :

$$B_x = -B_B = -B_m \sin(\omega t - 90^\circ) = B_m \cos \omega t ;$$

$$B_y = B_A = B_m \sin \omega t .$$

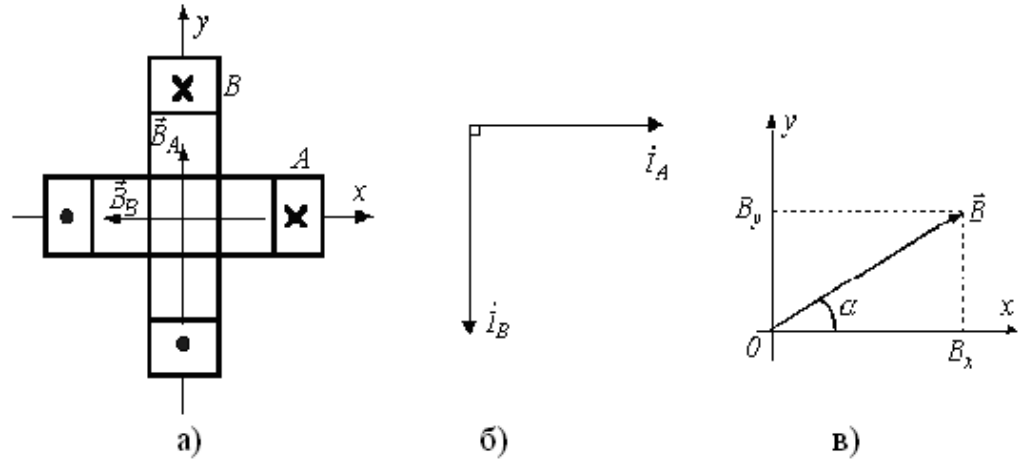


Рисунок 7.2 – Магнітне поле, що обертається, двофазної системи

Модуль результуючого вектору магнітної індукції відповідно до рис. 7.2 в дорівнює:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = B_m = \cos st, \quad (7.1)$$

при цьому для тангенса кута α , утвореного цим вектором з віссю абсцис, можна записати

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_y}{B_x} = \frac{B_m \sin \omega t}{B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t,$$

$$\text{звідки } \alpha = \omega t. \quad (7.2)$$

Отримані співвідношення (7.1) і (7.2) показують, що вектор результуючого магнітного поля незмінний по модулю і обертається в просторі з постійною кутовою частотою ω , описуючи коло, що відповідає круговому полю, що обертається.

Покажемо, що симетрична трифазна система котушок (рис. 7.3 а) також дозволяє отримати кругове магнітне поле, що обертається.

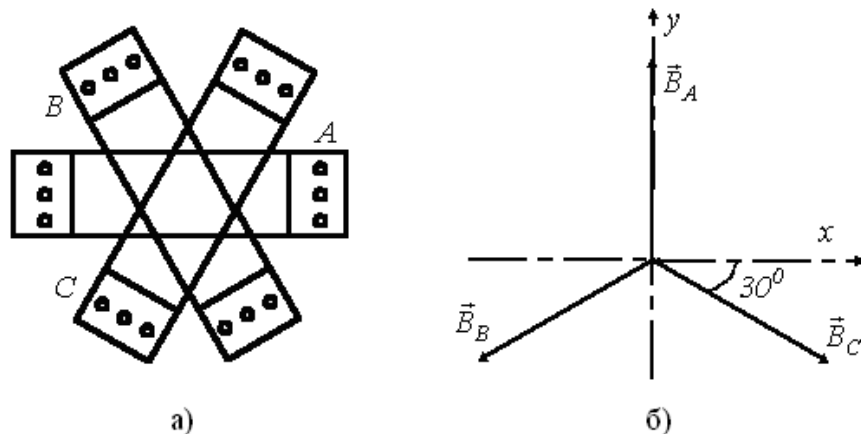


Рисунок 7.3 – Магнітне поле, що обертається, трифазної системи

Кожна з котушок A , B і C при пропусканні по них гармонійних струмів створює пульсуюче магнітне поле. Векторна діаграма в просторі для цих полів представлена на рис. 7.3 б. Для проєкцій результуючого вектору магнітної індукції на осі декартової системи координат, вісь y у якої поєднана з магнітною віссю фази A , можна записати:

$$B_x = B_C \cos 30^\circ - B_B \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}(B_C - B_B), \quad (7.3)$$

$$B_y = B_A - B_B \sin 30^\circ - B_C \sin 30^\circ = B_A - \frac{1}{2}(B_B + B_C). \quad (7.4)$$

Приведені співвідношення враховують просторове розташування котушок, але вони також живляться трифазною системою струмів з тимчасовим зрушенням по фазі на 120° . Тому для миттєвих значень індукцій котушок мають місце співвідношення:

$$B_A = B_m \sin \omega t, \quad B_B = B_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad B_C = B_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

Підставивши ці вирази в (7.3) і (7.4), отримаємо:

$$B_x = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m [\sin(\omega t + 120^\circ) - \sin(\omega t - 120^\circ)] = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m 2 \cos \omega t \sin \frac{2\pi}{3} = \frac{3}{2} B_m \cos \omega t, \quad (7.5)$$

$$\begin{aligned} B_y &= B_m \sin \omega t - \frac{1}{2} B_m [\sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t + 120^\circ)] = \\ &= B_m \sin \omega t - \frac{1}{2} B_m 2 \sin \omega t \cos \frac{2\pi}{3} = \frac{3}{2} B_m \sin \omega t \end{aligned} \quad (7.6)$$

Відповідно до (7.5) і (7.6) і рис 7.2 в для модуля вектору магнітної індукції результуючого поля трьох котушок із струмом можна записати:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{3}{2} B_m \cos st ,$$

а сам вектор \vec{B} складає з віссю x кут α , для якого

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_y}{B_x} = \frac{1,5 B_m \sin \omega t}{1,5 B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t ,$$

звідки $\alpha = \omega t$.

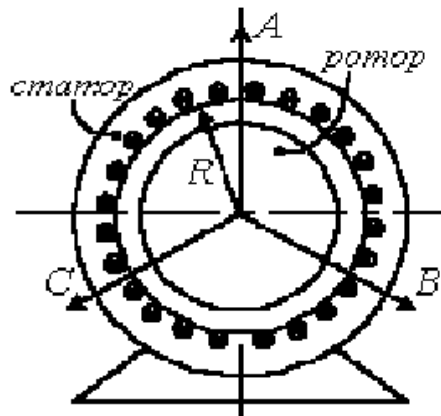


Рисунок 7.4 – Конструкція електродвигуна змінного струму

Таким чином, і в даному випадку має місце незмінний по модулю вектор магнітної індукції, що обертається в просторі з постійною кутовою частотою ω , що відповідає круговому полю.

7.3 Принцип дії асинхронного і синхронного двигунів

Облаштування асинхронного двигуна відповідає зображенню на рис. 7.4. Магнітне поле, що обертається, створюється розташованими на статорі обмотками із струмом, взаємодіє із струмами ротора, приводячи його в обертання.

Тобто з часом крива розподілу магнітної індукції, не міняючи своєї форми, переміщається уздовж кола статора. Отже, результуюче магнітне поле обертається з постійною швидкістю. Цю швидкість прийнято визначати в оборотах в хвилину:

$$n_o = \frac{2f\tau}{2p\tau} 60 = 60 \frac{f}{p},$$

де f - частота живлячої мережі;

p - кількість пар полюсів на статорі.

Найбільше поширення нині отримав асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором зважаючи на свою простоту і надійність. У пазах ротора такої машини розміщені струмопровідні мідні або алюмінієві стержні. Кінці усіх стержнів з обох торців ротора сполучені мідними або алюмінієвими ж кільцями, які замикають стержні накоротко. Звідси і сталася така назва ротора.

У короткозамкнутій обмотці ротора під дією ЕРС, що викликається полем статора, що обертається, виникають вихрові струми. Взаємодіючи з полем, вони залучають ротор до обертання із швидкістю ω , принципово меншої швидкості обертання поля ω_0 . Звідси назва двигуна - асинхронний.

Величина $S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ називається **відносним ковзанням**. Для

двигунів нормального виконання $S = 0,02...0,07$. Нерівність швидкостей магнітного поля і ротора стає очевидною, якщо врахувати, що при $\omega = \omega_0$ магнітне поле, що обертається, не перетинатиме струмопровідних стержнів ротора і, отже, в них не наводитимуться струми, що беруть участь в створенні моменту, що обертається.

Таким чином, швидкість обертання ротора асинхронного двигуна буде: $n = n_0(1 - s)$ [об/хв].

Принципова відмінність синхронного двигуна від асинхронного полягає у виконанні ротора. Останній у синхронного двигуна є магнітом, виконаним (при відносно невеликих потужностях) на базі постійного магніту або на основі електромагніту. Оскільки різнойменні полюси магнітів притягуються, те магнітне поле статора, що обертається, яке можна інтерпретувати як магніт, що обертається, захоплює за собою магнітний ротор, причому їх швидкості рівні. Це пояснює назву двигуна - синхронний.

На закінчення відмітимо, що на відміну від асинхронного двигуна $\cos \varphi$, у якого зазвичай не перевищує 0,8...0,85, у синхронного двигуна можна добитися більшого значення $\cos \varphi$ і зробити навіть так, що струм випереджатиме напругу по фазі. В цьому випадку, подібно до конденсаторних батарей, синхронна машина використовується для підвищення коефіцієнта потужності.

Контрольні питання

1. Яке поле називається пульсуючим?
2. Яке поле називається круговим, що обертається?
3. Які умови потрібні для створення кругового магнітного поля, що обертається?
4. Який принцип дії у асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором?
5. Який принцип дії у синхронного двигуна?
6. На які швидкості випускаються в нашій країні двигуни змінного струму загальнопромислового виконання?

8 БАЗОВИХ ПРИНЦИПІВ ДІЇ ТРАНСФОРМАТОРА

8.1 Загальних відомостей

Електричним трансформатором називається електротехнічний пристрій призначене для передачі електричної енергії з перетворенням величин напруги і струму. Трансформатори бувають: що підвищують, знижують, розділові, вимірювальні. Облаштування трансформатора показане на рис. 8.1.

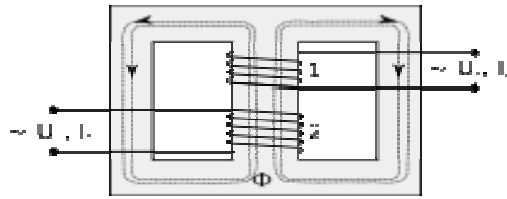


Рисунок 8.1 – Схематичне облаштування трансформатора

Схематичне облаштування трансформатора, представлено на рис.8.1:

1 - первинна обмотка,

2 - вторинна.

Робота трансформатора ґрунтована на двох базових принципах:

1. Електричний струм, що змінюється в часі, створює магнітне поле, що змінюється в часі (електромагнетизм).

2. Зміна магнітного потоку, що проходить через обмотку, створює ЕРС в цій обмотці (електромагнітна індукція).

На одну з обмоток, що називається *первинною обмоткою*, подається напруга від зовнішнього джерела. Змінний струм, що протікає по первинній обмотці, створює змінний магнітний потік в магнітопроводі. В результаті електромагнітної індукції, змінний магнітний потік в магнітопроводі створює в усіх обмотках, у тому числі і в первинній, ЕРС індукції, пропорційну першій похідній магнітного потоку, при синусоїдальному струмі зрушеної на 90° у зворотний бік по відношенню до магнітного потоку.

Простий силовий трансформатор складається з магнітопровода - сердечника, виконаного з феромагнітного матеріалу (зазвичай листова електротехнічна сталь) і двох обмоток (катушок), розташованих на стержнях магнітопровода. Одна з обмоток приєднана до джерела змінного струму на напругу U_1 , цю обмотку називають первинною. До іншої обмотки підключений споживач Z_H - її називають вторинною.

Дія трансформатора ґрунтована на явищі електромагнітної індукції. При підключенні первинної обмотки до джерела змінного струму у витках цієї обмотки протікає змінний струм I_1 , який створює в магнітопроводі змінний магнітний потік Φ . Замикаючись на магнітопроводі, цей потік зчіплюється з обома обмотками (первинною і вторинною) і індукує в них ЕРС :

$$e_1 = -w_1(d\Phi / dt), \quad (8.1)$$

$$e_2 = -w_2(d\Phi / dt), \quad (8.2)$$

де w_1 і w_2 , - число витків в первинній і вторинній обмотках трансформатора, відповідно.

При підключенні навантаження Z_H до виведень вторинної обмотки трансформатора під дією ЕРС e_2 в колі цієї обмотки створюється струм I_2 , а на виведеннях вторинної обмотки встановлюється напруга U_2 . У трансформаторах, що підвищують $U_2 > U_1$, а в тих, що знижують - $U_2 < U_1$

З (8.1) і (8.2) витікає, що ЕРС e_1 і e_2 , відрізняються один від одного числом витків обмоток, в яких вони наводяться. Тому, застосовуючи обмотки з необхідним співвідношенням витків, можна виготовити трансформатор на будь-яке відношення напруги.

Обмотку трансформатора, підключену до мережі з більш високою напругою, називають обмоткою вищої напруги (ВН); обмотку, приєднану до мережі меншої напруги, - обмоткою нижчої напруги (НН).

Трансформатори мають властивість оборотності; один і той же трансформатор можна використати в якості того, що підвищує і знижує. Але зазвичай трансформатор має певне призначення: або він є таким, що підвищує, або що знижує.

Трансформатор - це апарат змінного струму. Якщо ж його первинну обмотку підключити до джерела постійного струму, то магнітний потік і магнітопровід трансформатора також буде постійним як за величиною, так і за напрямком ($d\Phi/dt = 0$). Тому і в обмотках трансформатора не буде наводиться ЕРС.

8.2 Режим холостого ходу

Коли вторинні обмотки ні до чого не підключені (режим холостого ходу), ЕРС індукції в первинній обмотці практично повністю компенсує напругу джерела живлення, тому струм через первинну обмотку невеликий. Для трансформатора з сердечником з магнітомягкого матеріалу (наприклад, феромагнітного матеріалу, наприклад, з трансформаторної сталі) струм холостого ходу характеризує величину втрат в сердечнику на вихрові струми і на гістерезис. Потужність втрат можна вичислити помноживши струм холостого ходу на напругу, що подається на трансформатор. Напруга на вторинній обмотці в першому наближенні визначається законом Фарадея.

8.3 Режим короткого замикання

У режимі короткого замикання, на первинну обмотку трансформатора подається змінна напруга невеликої величини, виведення вторинної обмотки сполучають накоротко. Величину напруги на вході встановлюють такої, щоб струм короткого замикання дорівнював номінальному

(розрахунковому) струму трансформатора. У таких умовах величина напруги короткого замикання характеризує втрати в обмотках трансформатора, втрати на омичному опорі. Потужність втрат можна вичислити помноживши напругу короткого замикання на струм короткого замикання. Цей режим широко використовується у вимірювальних трансформаторах струму.

8.4 Режим з навантаженням

При підключенні навантаження до вторинної обмотки у вторинному колі виникає струм, що створює магнітний потік в магнітопроводі, спрямований протилежно магнітному потоку, що створюється первинною обмоткою. В результаті в первинному колі порушується рівність ЕРС індукції і ЕРС джерела живлення, що призводить до збільшення струму в первинній обмотці до тих пір, поки магнітний потік не досягне практично колишнього значення.

Схемний, процес перетворення можна зображувати таким чином:

$$U_1 \rightarrow I_1 \rightarrow I_1 \cdot N_1 \rightarrow \varepsilon_2 \rightarrow I_2.$$

Миттєвий магнітний потік в магнітопроводі трансформатора визначається інтегралом за часом від миттєвого значення ЕРС в первинній обмотці і у разі синусоїдальної напруги зрушать по фазі на 90° по відношенню до ЕРС. Наведена у вторинних обмотках ЕРС пропорційна першій похідній від магнітного потоку і для будь-якої форми струму співпадає по фазі і формі з ЕРС в первинній обмотці.

8.5 Закон Фарадея

ЕРС, створювана у вторинній обмотці, може бути вичислена за законом Фарадея, який свідчить, що :

$$U_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

де U_2 - напруга на вторинній обмотці,

N_2 - число витків у вторинній обмотці,

Φ - сумарний магнітний потік, через один виток обмотки.

Якщо витки обмотки розташовані перпендикулярно лініям магнітного поля, то потік буде пропорційний магнітному полю B і площі S через яку він проходить.

ЕРС, створювана в первинній обмотці, відповідно:

$$U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

де U_1 - миттєве значення напруги на кінцях первинної обмотки,

N_1 - число витків в первинній обмотці.

Поділивши рівняння U_2 на U_1 , отримаємо відношення:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}.$$

8.6 Рівняння ідеального трансформатора

Ідеальний трансформатор (рис. 8.2) - трансформатор, у якого відсутні втрати енергії на нагрів обмоток і потоки розсіяння обмоток. У ідеальному трансформаторі усі силові лінії проходять через усі витки обох обмоток, і оскільки магнітне поле, що змінюється, породжує одну і ту ж ЕРС в кожному витку, сумарна ЕРС, індукована в обмотці, пропорційна повному числу її витків. Такий трансформатор усю енергію, що поступає, з первинного кола трансформує в магнітне поле і, потім, в енергію вторинного кола. Енергія, що в цьому випадку поступає, дорівнює перетвореній енергії:

$$P_1 = I_1 \cdot U_1 = P_2 = I_2 \cdot U_2,$$

де P_1 - миттєве значення потужності, що поступає на трансформатор, поступає з первинного ланцюга,

P_2 - миттєве значення перетвореної трансформатором потужності, що поступає у вторинний ланцюг.

З'єднавши це рівняння з відношенням напруги на кінцях обмоток, отримаємо рівняння ідеального трансформатора:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}.$$

Таким чином отримуємо, що при збільшенні напруги на кінцях вторинної обмотки U_2 , зменшується струм вторинного кола I_2 .

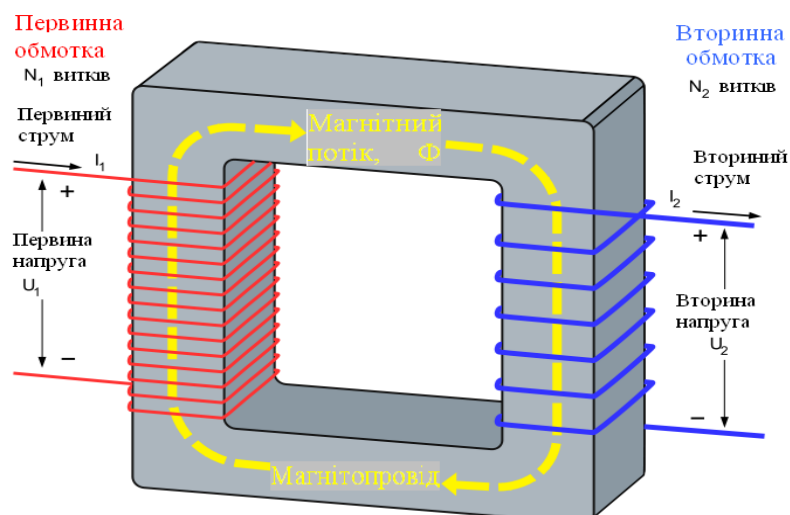


Рисунок 8.2 – Ідеальний трансформатор

Для перетворення опору одного кола до опору інший, треба помножити величину на квадрат відношення. Наприклад, опір Z_2 підключений до кінців вторинної обмотки, його приведення до первинного кола $Z'_1 = Z_2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$ буде. Це правило справедливо також і для вторинного кола: $Z'_2 = Z_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$.

8.7 Позначення на схемах

На схемах трансформатор позначається таким чином (рис.8.3).

Центральна товста лінія відповідає сердечникові, 1 - первинна обмотка (зазвичай ліворуч), 2, 3 - вторинні обмотки. Число напівкіл в дуже грубому наближенні символізує число витків обмотки (більше витків - більше напівкіл, але без строгої пропорційності).

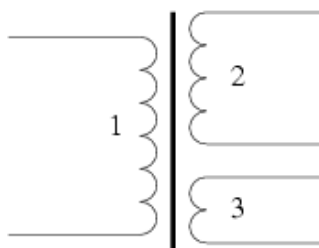


Рисунок 8.3 – Умовне графічне зображення трансформатора

При позначенні трансформатора жирною точкою біля виведення можуть бути вказані початок котушок (не менше чим на двох котушках, знаки що миттєво діє ЕРС на цих виведеннях однакові). Застосовується при позначенні проміжних трансформаторів в підсилювальних (перетворювальних) каскадах для підкреслення син - або протифазності, а також у разі декількох (первинних або вторинних) обмоток, якщо дотримання "полярності" їх підключення потрібне для роботи іншої частини схеми. Якщо початок обмоток не вказані явно, то передбачається, що усі вони спрямовані в один бік (після кінця однієї обмотки - початок наступної).

У схемах трифазних трансформаторів "обмотки" розташовують перпендикулярно "сердечникові" (Ш - образно, вторинні обмотки навпроти відповідних первинних), початок усіх обмоток спрямовані у бік "сердечника".

Контрольні питання

1. З яких частин складається трансформатор?
2. Назвіть два базові принципи, що лежать основі роботи трансформатора.
3. Які бувають трансформатори?
4. Як визначається коефіцієнт трансформації?
5. Чим характеризується ідеальний трансформатор?
6. Сформулюйте закон Фарадея.

Література

1. Лавріненко Ю. В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електротехніка та електроніка», Одеса, ОДЕКУ, 2016, - 66 с.
2. Лавріненко Ю. В. Теорія електрорадіокіл, ч. 1 . Конспект лекцій . – Одеса „Екологія”, 2008. - 69 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электроники, 6-е изд. – М.: Высшая школа, 1973.

4. Прокофьев В.Н. Электрические цепи. Учебное пособие. – Ленинград «ЛГИ», 1991.

Навчальне електронне видання

Лавріненко Юліан Володимирович

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ

Частина 1

"Електротехніка"

Конспект лекцій

Видавець і виготовлювач

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016

тел./факс: (0482) 32-67-35

Е-mail: info@odeku.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016