

**ДРОГОБИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА
Кафедра технологічної та професійної освіти**

Юрій Павловський

Електротехніка та електроніка: розрахунок електричних кіл змінного струму

Навчально-методичний посібник

**Дрогобич
2020**

УДК 621.1.016(075.8)

ББК 31.36я73

П12

*Рекомендовано до друку вченою радою
Дрогобицького державного педагогічного університету
імені Івана Франка (протокол № ____ від _____)*

Рецензенти:

Яким Р.С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологічної та професійної освіти Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка;

Пелещак Р.М. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка.

Відповідальний за випуск:

Вірт І.С. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри технологічної та професійної освіти Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка.

Павловський Ю.В.

П12 Електротехніка та електроніка: розрахунок електричних кіл змінного струму [навчально-методичний посібник для самостійної роботи студентів]. Дрогобич: Редакційно-видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, 2020. 132 с.

Навчальний посібник містить основні теоретичні відомості, розрахункові співвідношення та формули, методичні рекомендації та приклади розв'язування типових задач, а також задачі для самостійної роботи студентів з навчальної дисципліни «Електротехніка та електроніка» частини «Електричні кола змінного струму».

Посібник призначений для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями 014 Середня освіта (трудове навчання та технології) та 015 Професійна освіта (Транспорт).

Бібліографія – 49 назв.

© Павловський Ю.В., 2020

© Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,

Зміст

ПЕРЕДМОВА.....	5
РОЗДІЛ 1. ЗМІННИЙ СТРУМУ ТА ЙОГО ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ	6
1.1. Переваги змінного струму.....	6
1.2. Визначення змінного струму.....	6
1.3. Отримання синусоїдальної ЕРС.....	8
1.4. Параметри змінного струму.....	10
1.5. Фаза змінного струму, зсув фаз.....	11
1.6. Зображення синусоїдальних величин за допомогою векторів.....	12
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОДНОФАЗНИХ ТА ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	15
2.1. Основні елементи електричного кола.....	15
2.2. Розрахунок електричного кола змінного струму з опором R	18
2.3. Розрахунок кола змінного струму з індуктивністю L	19
2.4. Розрахунок кола змінного струму з активним опором та індуктивністю.....	20
2.5. Розрахунок кола змінного струму з конденсатором.....	22
2.6. Розрахунок кола з активним опором і ємністю.....	24
2.7. Коло з активним опором, індуктивністю та ємністю.....	25
2.8. Резонансний режим роботи кола змінного струму.....	27
2.8.1. Резонанс напруг.....	28
2.8.2. Резонанс струмів.....	30
2.9. Потужність у колах змінного струму.....	32
2.9.1. Розрахунок потужності в колах змінного струму.....	32
2.9.2. Визначення коефіцієнту потужності.....	34
2.10. Технологія отримання трифазної ЕРС. Основні схеми з'єднання трифазних кіл.....	35
2.11. З'єднання трифазного кола зіркою.....	38
2.12. Співвідношення між фазними і лінійними напругами та струмами при з'єднанні зіркою.....	40

2.13. Призначення нульового проводу в чотирипровідних колах.....	42
2.14. Розрахунок з'єднання навантаження трикутником.....	44
2.15. Активна, реактивна та повна потужності трифазного кола. Коефіцієнт потужності.....	46
РОЗДІЛ 3. ТРАНСФОРМАТОРИ.....	48
3.1. Трансформатори та їх призначення.....	48
3.2. Принцип роботи трансформатора.....	48
3.3. Рівняння ідеалізованого трансформатора.....	50
3.4. Схеми заміщення ідеалізованого трансформатора.....	51
3.5. Реальний трансформатор.....	53
3.6. Режими роботи трансформатора.....	55
3.6.1. Режим холостого ходу трансформатора.....	56
3.6.2. Режиму короткого замикання трансформатора.....	57
3.7. Зміна напруги на вторинній обмотці трансформатора.....	58
3.8. Втрати енергії та ККД трансформатора.....	59
3.9. Трифазні трансформатори.....	60
3.10. Автотрансформатори.....	63
3.11. Вимірювальні трансформатори.....	65
3.12. Імпульсний трансформатор.....	67
3.13. Сучасні високовольтні оптико-електронні трансформатори струму та напруги.....	69
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ СОМОКОНТРОЛЮ.....	72
4.1. Приклади розв'язування задач.....	72
4.2. Тестові завдання.....	101
4.3. Задачі для самостійного розв'язування.....	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	125
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	126
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК.....	127

ПЕРЕДМОВА

Навчально-методичний посібник, який укладено на основі освітньої програми з навчальної дисципліни «Електротехніка та електроніка» підготовки бакалаврів спеціальності 014 Середня освіта (трудове навчання та технології) та 015 Професійна освіта (Транспорт), містить основні теоретичні положення, розрахункові формули й співвідношення, методичні рекомендації, приклади розв'язування задач та завдання для самостійної роботи студентів.

У посібнику наведено 25 прикладів розв'язування задач, 52 тестові завдання та 45 задач для самостійної роботи.

У більшості наведених задач використовується міжнародна система одиниць вимірювань (СІ). Проте з урахуванням широкого розповсюдження у техніці та інженерній практиці вимірювальних приладів, проградуєваних в одиницях інших систем, деякі з них містять дані у позасистемних одиницях.

Матеріал навчального посібника допоможе студентам повторити основні теоретичні відомості з електротехніки та електроніки, засвоїти методи розрахунку електричних кіл змінного однофазного та трифазного струму та сформувати навички вирішення практичних завдань.

Посібник може слугувати довідником при виконанні курсових і випускових робіт, у практичній інженерно-технічній діяльності, буде корисним інженерам, технікам, учителям трудового навчання та технологій, викладачам і майстрам виробничого навчання ЗВО, керівникам технічних гуртків.

РОЗДІЛ 1. ЗМІННИЙ СТРУМУ ТА ЙОГО ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ

1.1. Переваги змінного струму

Сьогодні переважна більшість споживачів використовує для своїх потреб саме змінний струм. Перш за все, це пов'язано з можливістю централізованого виробництва такого виду електроенергії з подальшою передачею її на значні відстані. Як відомо, потужність (яка в даному випадку є прямими втратами), що виділяється при нагріванні провідника за рахунок проходження через нього електричного струму, обернено пропорційна до квадрату напруги. Таким чином, збільшивши напругу в передавальній електромережі, наприклад, в десять разів, можна скоротити втрати в 100 разів. Використання змінного струму дозволяє за допомогою такого ефективного інструменту, як трансформатор, широко варіювати напругою на окремих ділянках кола. Тобто, саме змінний струм набагато простіше трансформувати з низької напруги у високу і навпаки.

Безперечною перевагою використання змінного струму є також і більш проста конструкція генераторів – головних джерел перетворення різних видів енергії (і перш за все механічної) в електричну. Вони, як і електродвигуни аналогічного типу, надійніші в роботі, простіші в обслуговуванні і мають нищу собівартість при виготовленні.

Крім того, дуже широко використовується трифазна змінна напруга, що дозволяє не тільки економніше здійснювати транспортування електроенергії, а й застосовувати дуже прості та надійні асинхронні двигуни. В останніх за рахунок зміщення фаз створюється постійне обертове магнітне поле, що дозволяє максимально спростити конструкцію.

Ще однією перевагою змінного струму є його відносно легка можливість перетворення, при необхідності, в постійний струм. Для цього використовують випрямлячі різних типів.

1.2. Визначення змінного струму

Можливість отримувати змінний струм різної напруги – високої для передачі енергії, низької для живлення приймачів енергії, простота пристрою генераторів і двигунів змінного струму забезпечили змінному струму його повсюдне застосування.

Змінним струмом називають періодичний струм, значення якого

повторюються через однакові проміжки часу, які називають періодом T . впродовж одного напівперіоду струм має один напрям, а впродовж наступного – зворотній [1].

Сукупність усіх змін змінної величини, що відбуваються впродовж періоду, називається циклом. Число циклів змін за одну секунду називається частотою f .

Частота – величина обернена до періоду,

$$f = 1/T. \quad (1.1)$$

Одиниця частоти називається герц (Гц), $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$.

На рис. 1.1 наведені часові діаграми зміни (графіки) періодичного змінного струму (струм такої форми застосовується в електронних пристроях). По осі абсцис відкладено час, а по осі ординат – значення струму.

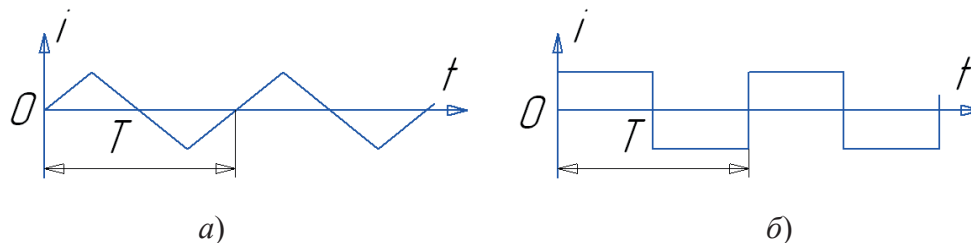


Рис. 1.1. Графіки змінного струму:
а – трикутної форми; б – прямокутної форми

В електротехніці найчастіше використовують синусоїдальний змінний струм, тобто струм, величина якого змінюється за законом синуса, що має низку переваг порівняно з іншими періодичними струмами: підвищується коефіцієнт корисної дії (ККД) електричних машин та апаратів, поліпшуються їх характеристики, спрощуються всі розрахунки [1].

В Україні (та в Європі) для промислових електроустановок прийнята стандартна частота 50 Гц. Поширені також похідні одиниці частоти:

- кілогерц (кГц) $1 \text{ кГц} = 10^3 \text{ Гц}$;
- мегагерц (МГц) $1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}$;
- гігагерц (ГГц) $1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$.

Графік змінного синусоїдального струму приведено на рис. 1.2.

Змінні значення струму, напруги та електрорушійної сили (ЕРС) в довільні моменти часу називаються миттєвими значеннями, які позначаються малими латинськими буквами i , u та e [1].

Найбільше з миттєвих значень за час періоду називається максимальним або амплітудним значенням, яке позначається великою літерою з індексом «М»

I_M ; U_M ; E_M (рис. 1.2).

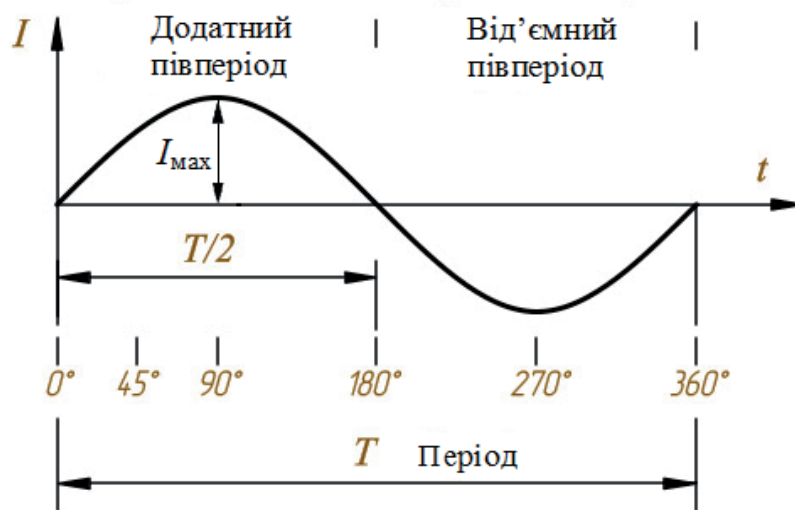


Рис. 1.2. Графік змінного синусоїдального струму

1.3. Отримання синусоїдальної ЕРС

Змінну синусоїдальну ЕРС отримують в генераторах змінного струму. Це досить складні електричні машини (рис. 1.3). Розглянемо ідею отримання змінного струму.

Нехай в однорідному магнітному полі постійного магніту (рис. 1.4) рівномірно обертається з кутовою швидкістю циліндричний якор 1. На його поверхні закріплена котушка 2, кінці якої через контактні кільця і щітки з'єднані із зовнішнім колом [2].

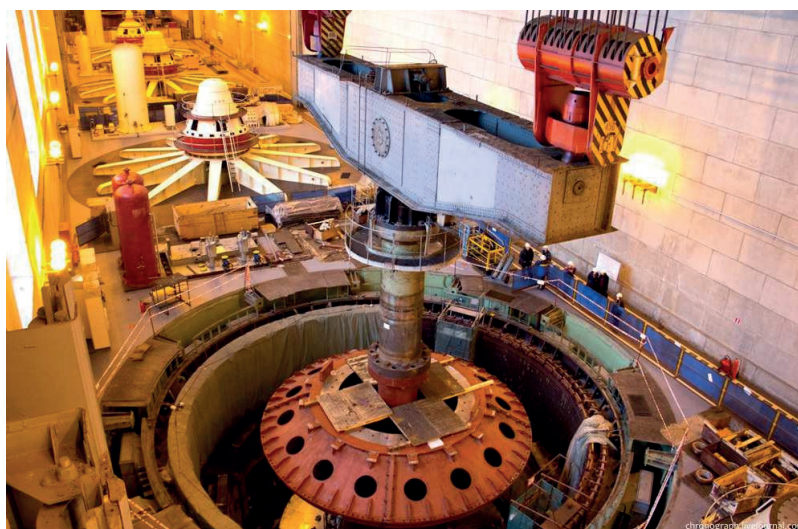


Рис. 1.3. Генератор гідроелектростанції

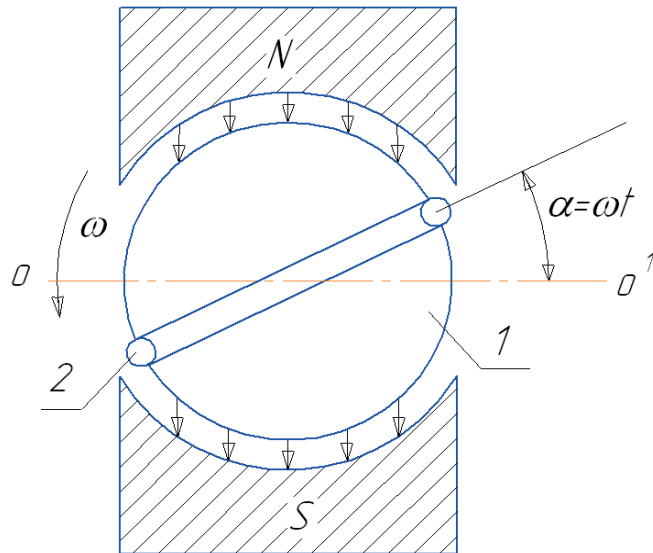


Рис. 1.4. Схема генератора змінного струму

Полюсам надана така форма, при якій магнітна індукція B у повітряному зазорі вздовж кола якоря змінюється за синусоїдальним законом

$$B = B_M \sin \alpha, \quad (1.2)$$

де α – кут, утворений нейтральною площиною OO' та площиною витків котушки; B_M – максимальне значення індукції магнітного поля.

Оскільки при рівномірному обертанні котушки кутова швидкість $\omega = \alpha/t$, то кут α буде змінюватися за законом $\alpha = \omega t$, і формула (1.2) набуде вигляду

$$B = B_M \sin \omega t.$$

Величину ω називають кутовою частотою. Оскільки при обертанні котушки магнітний потік, який її перетинає весь час змінюється, то за законом електромагнітної індукції в ній буде наводитися ЕРС, що змінюється за синусоїдальним законом:

$$E = E_M \sin \omega t.$$

Якщо до затискачів генератора під'єднати навантаження, то через нього потече струм, який також буде змінюватися за синусоїдальним законом [2].

Графік синусоїдального струму $i = I_M \sin \omega t$ представлений на рис. 1.5. На осі ординат відкладається струм i , на осі абсцис – кут $\alpha = \omega t$.

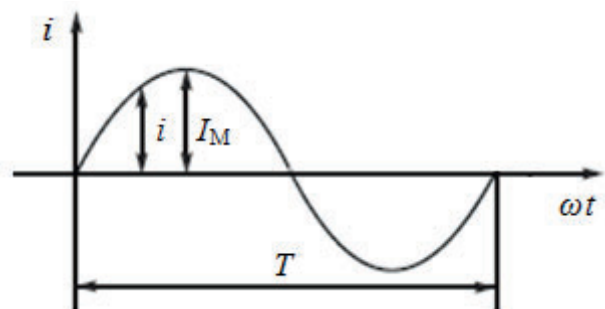


Рис. 1.5. Графік синусоїдального струму

1.4. Параметри змінного струму

Для кількісної оцінки синусоїдального змінного струму служать такі параметри [3]:

1. Миттєві значення струму i , напруги u і ЕРС e . Їх значення в будь-який момент часу t мають значення: $i = I_M \sin \omega t$; $u = U_M \sin \omega t$; $e = E_M \sin \omega t$. Миттєві значення електричних величин позначаються малими буквами латинського алфавіту (i , u , e).

2. Амплітудні значення струму I_M ; напруги U_M ; ЕРС E_M – максимальні значення миттєвих величин i , u , та e . Позначаються прописними буквами латинського алфавіту з нижнім індексом « A » або « M ».

3. Період T – проміжок часу, впродовж якого струм виконує повне коливання і приймає попереднє за величиною та знаком миттєве значення. Період виражають у секундах (с), мілісекундах (мс) і мікросекундах (мкс).

4. Циклічна частота f – величина обернена до періоду T

$$f = 1/T,$$

вона характеризує число повних коливань струму за 1 с.

5. Кутова швидкість ω характеризує кутову швидкість обертання котушки генератора в магнітному полі. Котушка генератора проходить кутовий шлях 2π за час рівний періоду T , тоді кутова швидкість $\omega = 2\pi / T$. З урахуванням (1.1) отримаємо:

$$\omega = 2\pi f. \quad (1.3)$$

6. Діюче значення струму I , напруги U і ЕРС E . Оскільки миттєвих значень синусоїдальних електричних величин існує безліч, а амплітудні значення дуже короткочасні, і їх важко виміряти, то для вимірювання величин змінного струму, напруги та ЕРС вводять поняття діючого значення. При цьому змінний струм порівнюють з постійним струмом за тепловим впливом.

Резистор R на схемі рис. 1.6, *а* підключений у коло змінного струму, а такий самий резистор на рис. 1.6, *б* підключений у коло постійного струму. Якщо кількість теплоти, що виділяється в схемах рис. 1.6, *а*, *б* на резисторі R однаково, то можна вважати, що і струми в схемах однакові.

Таким чином, діюче значення змінного струму рівне такому постійному струму, який за час одного періоду, виділяє на даному резисторі однакову кількість теплоти зі змінним струмом.

Діючі значення електричних величин позначаються прописними буквами

латинського алфавіту без індексів (I , U , E). Ці значення використовуються при вимірюванні електричних величин та при розрахунках.

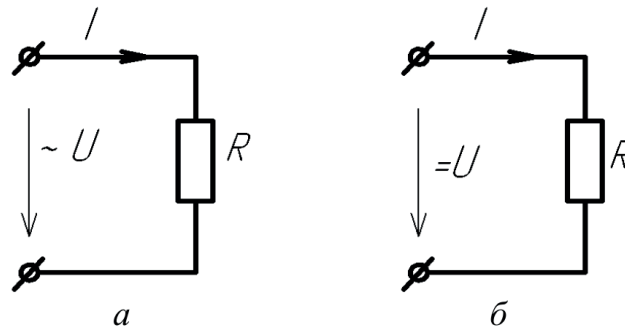


Рис. 1.6. До визначення поняття діючого значення змінного струму:
 a – коло змінного струму; b – ланцюг постійного струму

Співвідношення між діючим I та амплітудним I_M значеннями струму описується виразом:

$$I = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot I_M \quad (1.4)$$

1.5. Фаза змінного струму, зсув фаз

Нехай на якорі генератора розташовані дві однакових обмотки 1 і 2, зсунутих в просторі на кут φ , як показано на рис. 1.7.

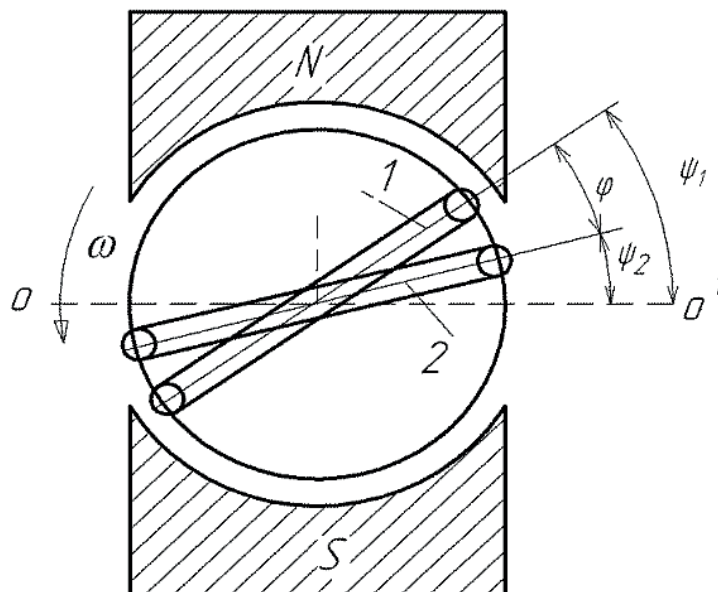


Рис. 1.7. Якір генератора змінного струму з двома обмотками

При обертанні якоря в магнітному полі статора в обмотках 1 і 2 наводяться ЕРС електромагнітної індукції однаковою частоти ω та амплітуди E_M (рис. 1.8), оскільки рівні витки обмоток обертаються з однаковою частотою та в одному і тому ж магнітному полі.

Електричні кути ψ_1 і ψ_2 характеризують значення ЕРС в початковий момент часу і називаються початковими фазами.

Оскільки початкові фази ЕРС різні, максимальні значення ЕРС у витках настають не одночасно, а з фіксованим зсувом у часі. Часовий зсув визначається різницею початкових фаз і називається зсувом фаз φ (рис. 1.8):

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2.$$

У даному випадку ЕРС e_1 є випереджаючою, а друга (e_2) – відстаючою по фазі.

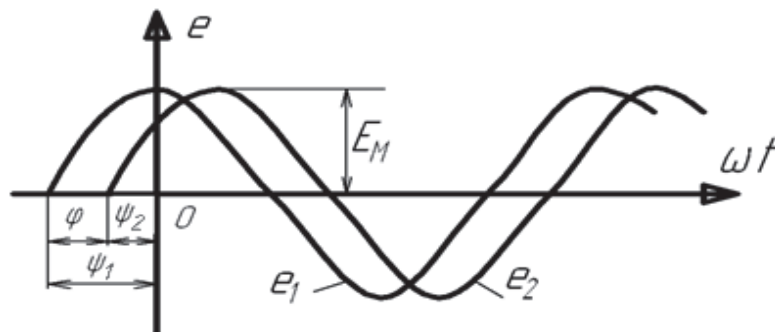


Рис. 1.8. Пояснення поняття фаза і зсув фази

На рис. 1.9 наведені два варіанти кутів зсуву фаз між струмом I і напругою U . На рис. 1.9, а струм і напруга співпадають по фазі ($\varphi = 0^\circ$). На рис. 1.9, б струм і напруга перебувають у протифазі ($\varphi = 180^\circ$).

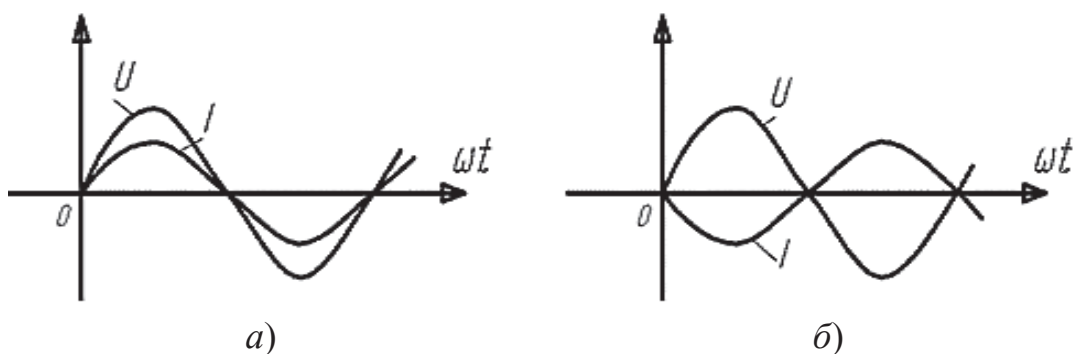


Рис. 1.9. Варіанти зсуву фаз: а – збіг по фазі; б – у протифазі

1.6. Зображення синусоїдальних величин за допомогою векторів

При розрахунку кіл змінного струму часто доводиться проводити операції додавання і віднімання струмів і напруг. Коли струми та напруги задані аналітично або часовими діаграмами, ці операції виявляються досить громіздкими. Метод побудови векторних діаграм дозволяє значно спростити дії над синусоїдальними величинами. Покажемо, що синусоїдальна величина може бути представлена обертовим вектором.

Нехай вектор \vec{I}_M обертається з постійною кутовою частотою ω проти годинникової стрілки. Початкове положення вектора \vec{I}_M задано кутом ψ (рис. 1.10). Проекція вектора \vec{I}_M на вісь y визначається виразом $I_M \sin(\omega t + \psi)$, яке відповідає миттєвому значенню змінного струму. Таким чином, часова діаграма змінного струму є розгорткою за часом вертикальної проекції вектора \vec{I}_M , що обертається проти часової стрілки зі швидкістю ω [3].

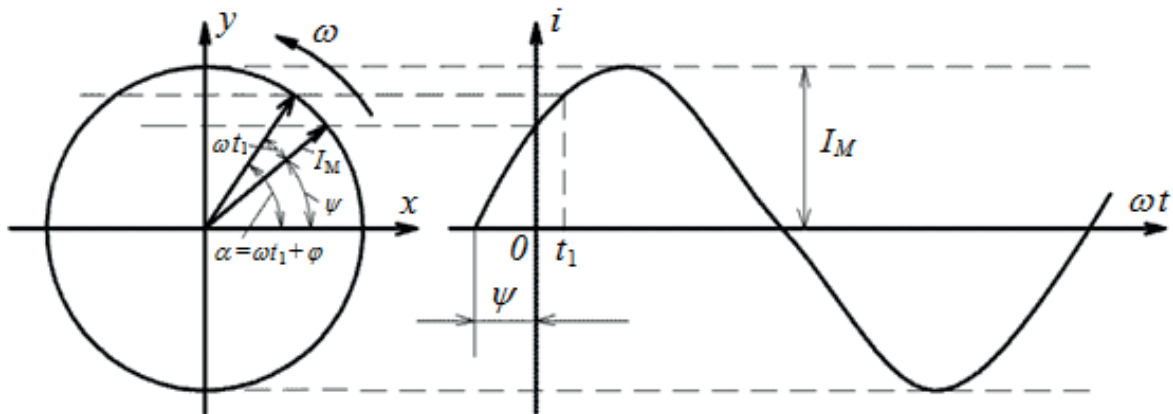


Рис. 1.10. Зображення синусоїдального струму обертовим вектором

Зображення синусоїдальних величин за допомогою векторів дає можливість наочно показати початкові фази цих величин і зсув фаз між ними. На векторних діаграмах довжини векторів відповідають діючим значенням струмів і напруг [3].

Сукупність декількох векторів, що відповідають нульовому моменту часу, називають векторною діаграмою. Оскільки кутові швидкості всіх векторів на векторній діаграмі однакові, то взаємне розташування їх не змінюється. Тому

при побудові один з векторів на векторній діаграмі можна розташувати довільно, а інші вектори розташовувати по відношенню до нього під кутами, рівними кутам зсуву фаз.

Додавання синусоїдальних величин можна замінити додаванням векторів, що їх зображують. Віднімання однієї синусоїдальної величини від іншої також зводиться до операції додавання з протилежним за знаком вектором, тобто

$$I_1 - I_2 = I_1 + (-I_2).$$

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОДНОФАЗНИХ ТА ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1. Основні елементи електричного кола

Необхідно пам'ятати, що при виникненні змінного струму в електричному колі та в навколишньому середовищі існує магнітне і електричне поля. Крім того відбувається перетворення електромагнітної енергії в теплову.

В електричних колах при постійній напрузі на його затискачах струм, потужність і енергія, накопичені в електричному та магнітному полях, залишаються незмінними. При змінній напрузі на затискачах кола всі перераховані величини змінюються в часі. На окремих ділянках електричного кола яскраво виражені магнітні поля, це котушки індуктивності L (рис. 2.1, 2.2). На інших яскраво виражені електричні поля, це конденсатори C (рис. 2.3, 2.4).

Є ділянки кіл, де відбуваються перетворення електромагнітної енергії в теплову, це резистори R (рис. 2.5-2.7).

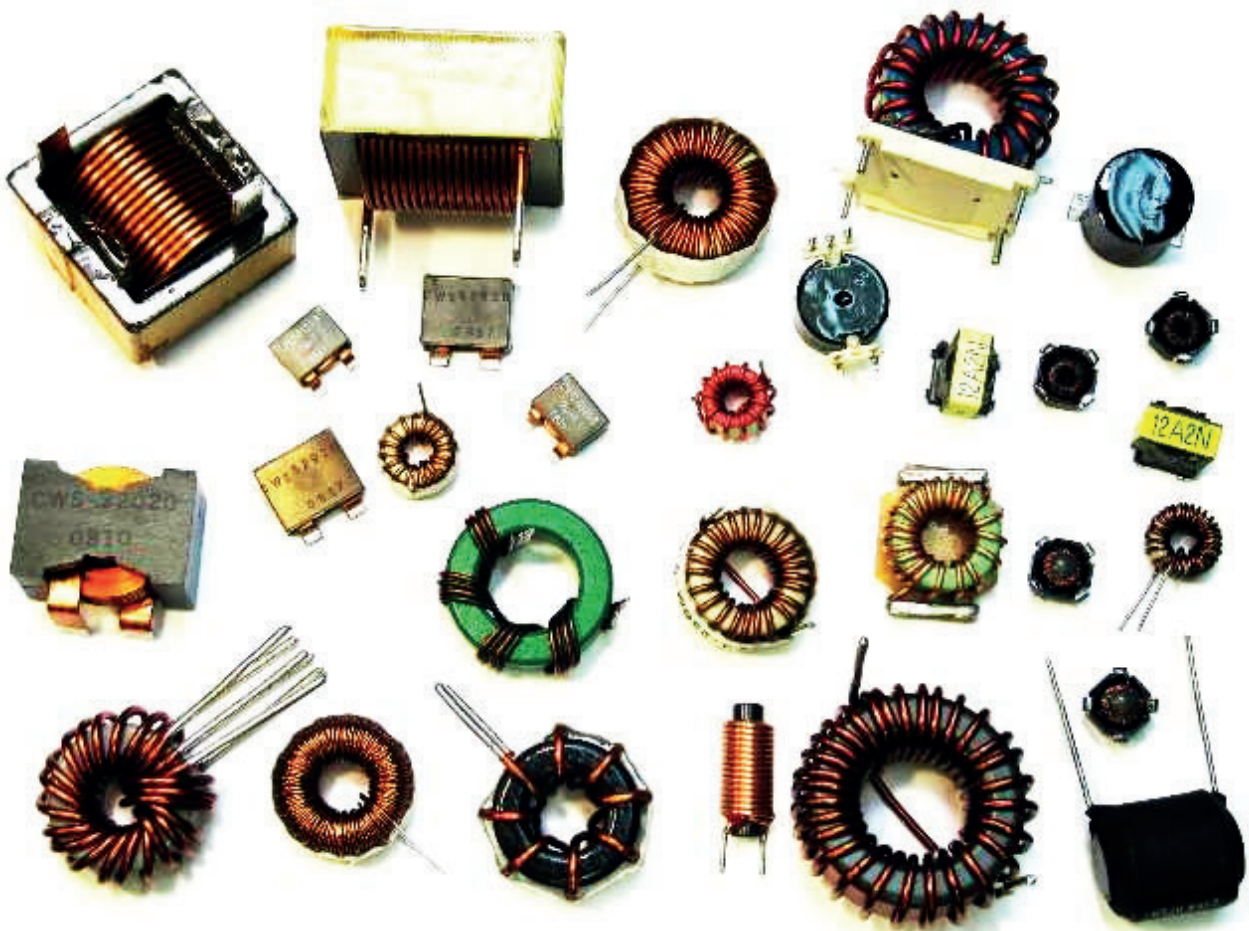


Рис. 2.1. Котушки індуктивності малої величини



Рис. 2.2. Котушки індуктивності більшої величини

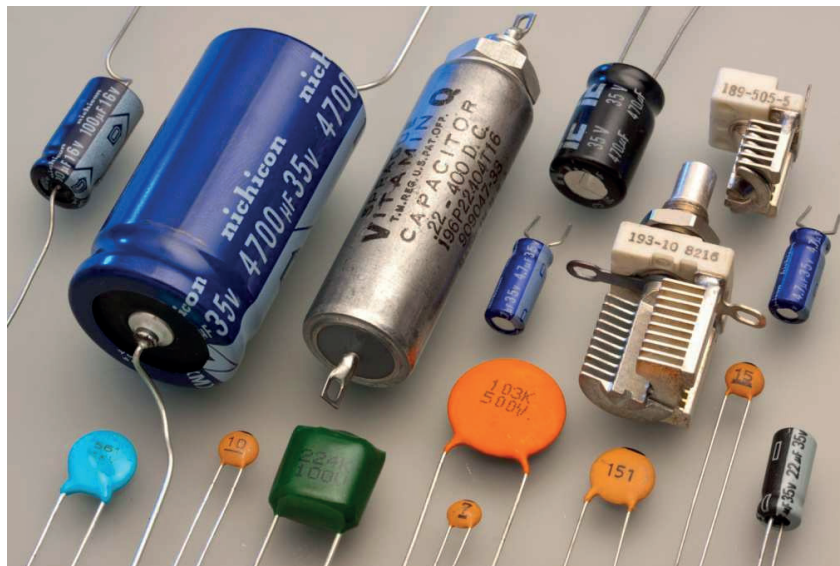


Рис. 2.3. Конденсатори малої ємності



Рис. 2.4. Конденсатори великої ємності

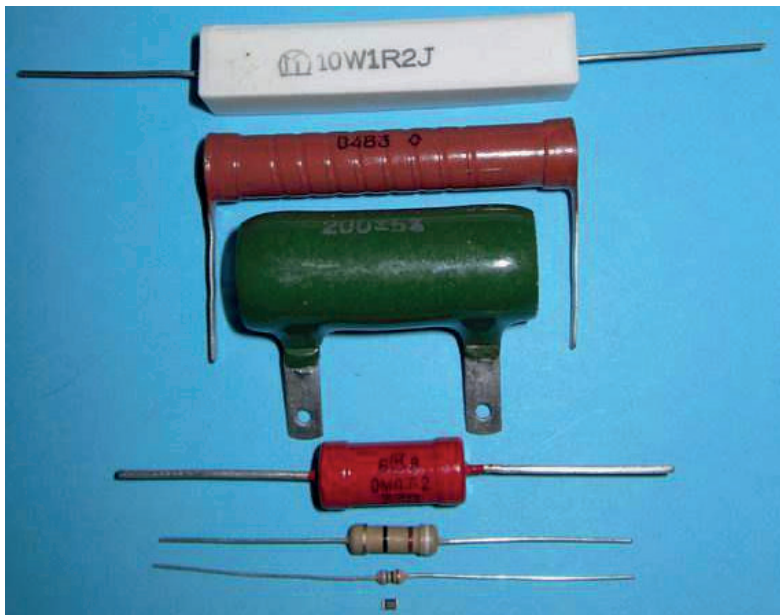


Рис. 2.5. Резистори малої потужності



Рис. 2.6. Змінні резистори (потенціометри)

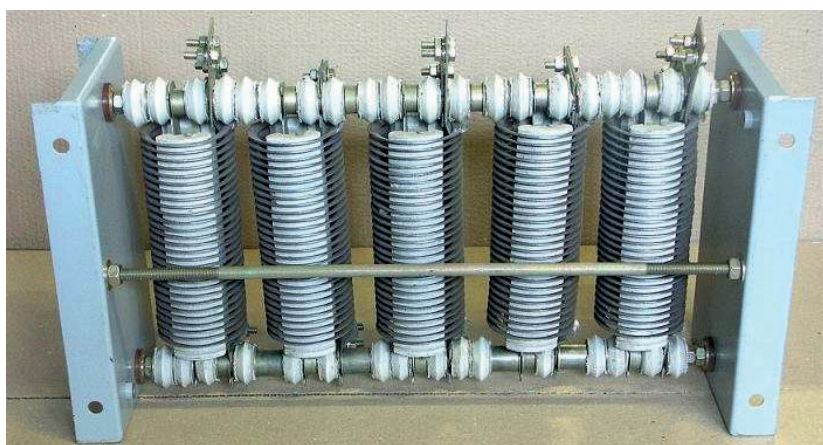


Рис. 2.7. Резистори великої потужності

2.2. Розрахунок електричного кола змінного струму з опором R

При синусоїдальній напрузі

$$u = U_M \cdot \sin \omega t$$

на затискачах кола з опором R (рис. 2.8) за законом Ома струм у ньому дорівнює [4]:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_M}{R} \cdot \sin \omega t = I_M \cdot \sin \omega t \quad (2.1)$$

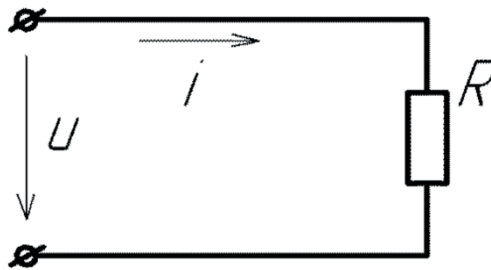


Рис. 2.8. Коло змінного струму з активним опором

Отже, струм у резисторі R змінюється синусоїдально, збігаючись по фазі з напругою (рис. 2.9, а, б).

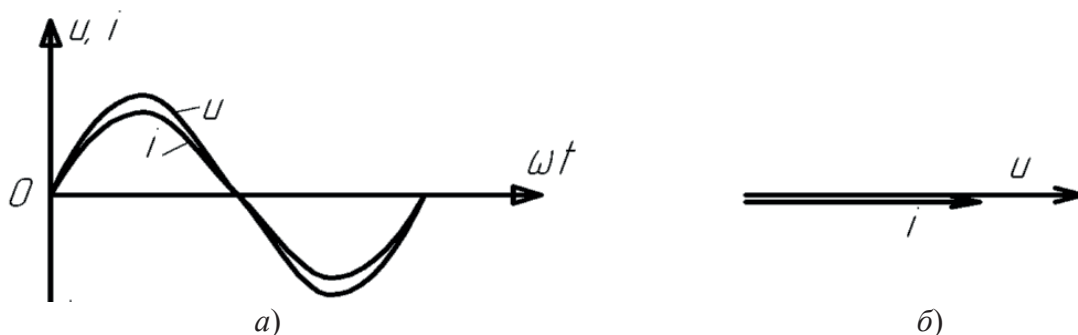


Рис. 2.9. Часова діаграма (а) і векторна діаграма (б) для кола з активним опором

Електрична енергія у резисторі перетвориться в теплоту незалежно від напрямку струму. Середня за період потужність [4]:

$$P = I^2 R = I \cdot IR = IU \quad (2.2)$$

Вона називається активною потужністю, а опір R – активним опором.

Одиницею вимірювання активної потужності є ват (Вт). Похідні одиниці:

- кіловат (кВт) – $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$;
- мегават (МВт) – $1 \text{ МВт} = 10^6 \text{ Вт}$.

2.3. Розрахунок кола змінного струму з індуктивністю L

При струмі $i = I_M \cdot \sin \omega t$ в колі з індуктивністю (рис. 2.10) навколо котушки виникає змінне магнітне поле і в котушці наводиться ЕРС самоіндукції. Якщо коло з індуктивністю має дуже малий опір ($R = 0$) то прикладена до кола напруга джерела викликає в ньому такий струм, магнітне поле якого при своїй зміні індуктує ЕРС самоіндукції, яка рівна та протилежна за напрямом до прикладеної напруги, тобто врівноважує цю напругу [5]: $u = -e_L$. Оскільки

$$e_L = -L \frac{di}{dt}, \text{ то}$$

$$u = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_M \sin \omega t)}{dt} = I_M \omega L \cos \omega t,$$

або

$$u = U_M \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.3)$$

$$U_M = I_M \omega L. \quad (2.4)$$

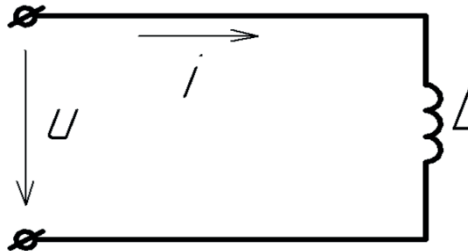


Рис. 2.10. Коло змінного струму з індуктивністю

З рівняння (2.3) випливає, що струм в колі з індуктивністю відстає по фазі від напруги на кут $\pi/2$ (рис. 2.11) [5].

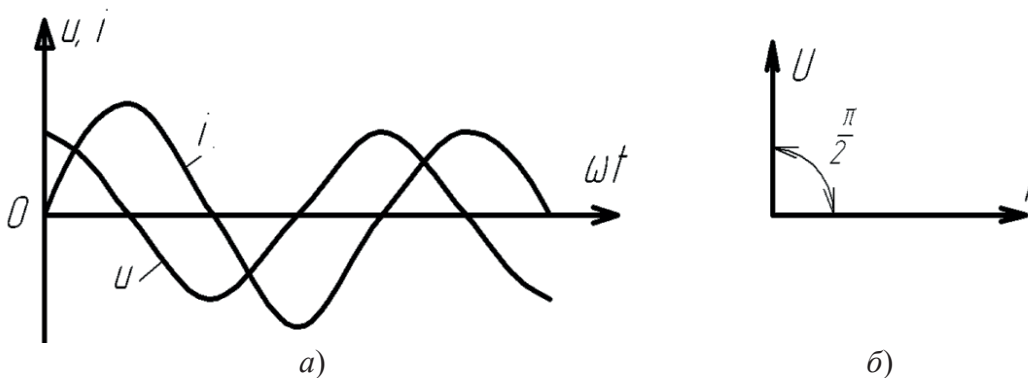


Рис. 2.11. часова діаграма (а) і векторна діаграма (б) для кола з індуктивністю

Фізично це пояснюється тим, що індуктивна котушка реалізує інерцію електромагнітних процесів. Індуктивність котушки L є кількісною мірою цієї інерції [5].

З виразу (2.4) запишемо закон Ома для амплітудних значень [5]:

$$I_M = \frac{U_M}{\omega L} = \frac{U}{X_L} \quad (2.5)$$

Розділивши на $\sqrt{2}$ вираз (2.5), отримаємо закон Ома для діючих значень [5]:

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{X_L}$$

Відношення напруги до струму кола

$$\frac{U}{I} = X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (2.6)$$

називається реактивним опором індуктивності X_L , або індуктивним опором. Індуктивний опір пропорційний індуктивності та частоті струму. При постійному струмі він дорівнює нулю [5].

2.4. Розрахунок кола змінного струму з активним опором та індуктивністю

Нехай електричне коло (рис. 2.12) містить ділянки, властивості яких нам відомі. Проаналізуємо процеси в даному колі [3].

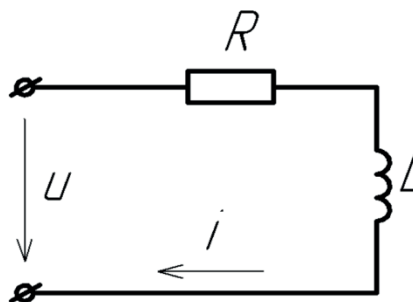


Рис. 2.12. Коло змінного струму з опором R та індуктивністю L

Струм в колі змінюється за законом синуса $i = I_M \cdot \sin \omega t$. Тоді напруга на активному опорі $u_R = U_{RM} \sin \omega t$, оскільки на цій ділянці напруга та струм

збігаються по фазі. Напряга на котушці індуктивності

$u_L = U_{LM} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$, оскільки на індуктивності напряга випереджає по фазі струм на кут $\pi/2$ [3].

Побудуємо векторну діаграму для розглянутого кола (рис. 2.13). Спочатку, відкладаємо довільно вектор струму I , а тоді вектор спаду напруги U_R на резисторі, що співпадає по фазі з вектором струму. Початок вектора спаду напруги U_L на індуктивності, який випереджає вектор струму на кут $\pi/2$, з'єднаємо з кінцем вектора U_R для зручності їх додавання. Сумарна напряга $u = U_M \sin(\omega t + \phi)$ зображується вектором U , зсунутим по фазі відносно вектора струму на кут ϕ [3].

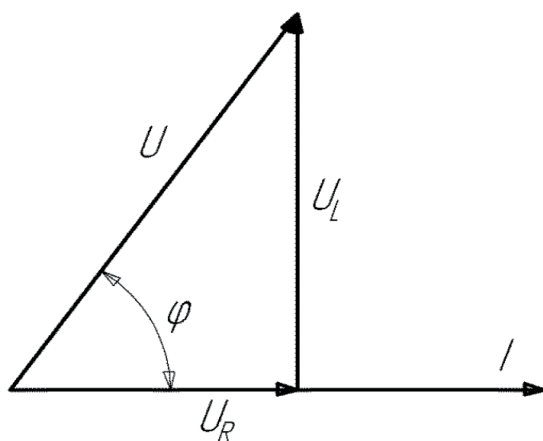


Рис. 2.13. Векторна діаграма для кола з опором R та індуктивністю L

Вектори U_R , U_L та U утворюють трикутник напруг. Спробуємо одержати закон Ома для цього кола. Для трикутника напруг, відповідно до теореми

Піфагора, одержимо $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$. Але $U_R = I \cdot R$, а $U_L = I \cdot X_L$; отже,

$$U = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_L^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2}, \text{ звідки}$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}.$$

Введемо позначення $\sqrt{R^2 + X_L^2} = Z$, де Z – повний опір кола. Тоді вираз закону Ома прийме вигляд:

$$I = \frac{U}{Z}$$

Оскільки повний опір кола Z визначається за теоремою Піфагора, йому відповідає трикутник опорів (рис. 2.14).

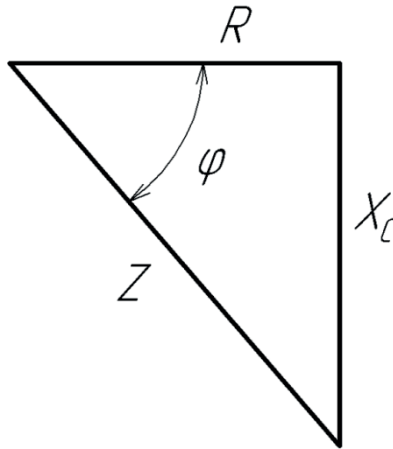


Рис. 2.14. Трикутник опорів для кола з резистором R та індуктивністю L

Трикутник опорів подібний до трикутника напруг. Зсув фаз ϕ між струмом і напругою визначається з трикутника опорів [2]:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{X_L}{R}$$

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{X_L}{R}$$

Прийнято відраховувати кут ϕ від вектора струму I . Оскільки вектор U зсунутий по фазі відносно вектора струму I на кут ϕ проти годинникової стрілки (тобто випереджає його), цей кут має позитивне значення [2].

2.5. Розрахунок кола змінного струму з конденсатором

Проаналізуємо процеси в колі, представленою на рис. 2.15.

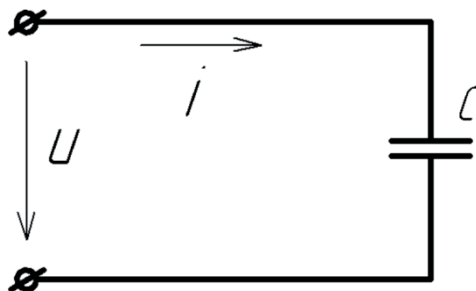


Рис. 2.15. Коло змінного струму з конденсатором

Нехай напруга на затискачах джерела $u = U_M \sin \omega t$, тоді струм в колі також буде змінюватися за синусоїдальним законом. Силу струму визначають за формулою $i = dQ/dt$. Заряд Q на обкладках конденсатора пов'язаний з напругою на конденсаторі та його ємністю [6]:

$$Q = Cu$$

Відповідно

$$\begin{aligned} i &= \frac{dQ}{dt} = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_M \sin \omega t)}{dt} = U_M \omega C \cos \omega t = \\ &= U_M \omega C \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Таким чином, струм в колі з ємністю випереджає по фазі напругу на кут $\pi/2$ (рис. 2.16) [6].

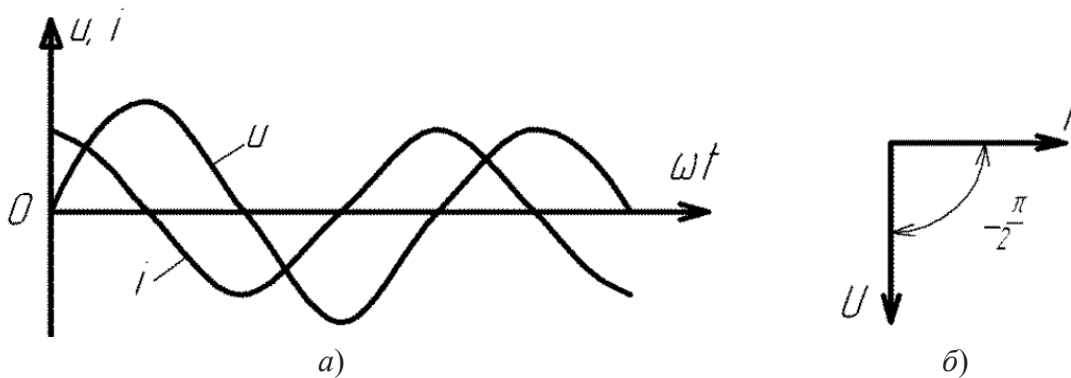


Рис. 2.16. Часова діаграма (а) і векторна діаграма (б) для кола з ємністю

Виведемо закон Ома для кола з ємністю. З виразу (2.7) випливає, що $I_M = U_M \omega C$, або

$$I_M = \frac{U_M}{1/(\omega C)}$$

Введемо позначення:

$$1/(\omega C) = 1/(2\pi fC) = X_C, \quad (2.8)$$

де X_C – ємнісний реактивний опір кола.

Тоді, для діючих значень, закон Ома можна представити в такому вигляді:

$$I = \frac{U}{X_C}$$

З формули (2.8) видно, що ємнісний опір X_C зменшується зі зростанням

частоти f . Це можна пояснити тим, що при великій частоті через поперечний переріз діелектрика протікає більший електричний заряд, що еквівалентно зменшенню опору [6].

2.6. Розрахунок кола з активним опором і ємністю

Методика вивчення кола з R і C (рис. 2.17) аналогічна методиці вивчення кола з R і L .

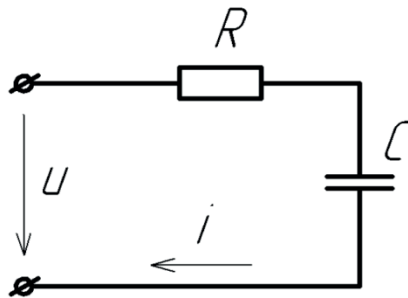


Рис. 2.17. Коло змінного струму з опором R та ємністю C

Задаємося струмом в колі $i = I_M \cdot \sin \omega t$. Тоді спад напруги на активному опорі $u_R = U_{RM} \sin \omega t$ збігається по фазі зі струмом. Напруга на конденсаторі

відстає по фазі від струму на кут $\pi/2$: $u_C = U_{CM} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$ [7]. На основі цього побудуємо векторну діаграму для даного кола (рис. 2.18).

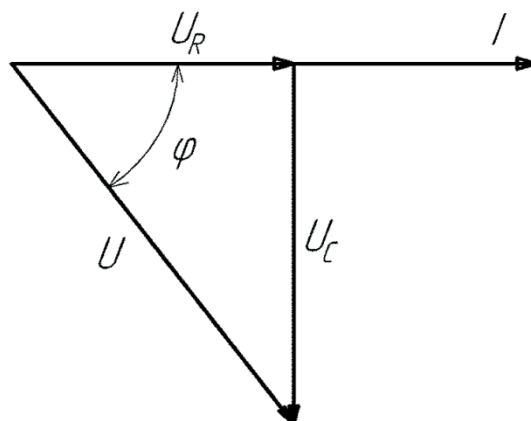


Рис. 2.18. Векторна діаграма для кола з опором R та ємністю C

З векторної діаграми випливає, що $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$. Але $U_R = I \cdot R$, а

$U_C = I \cdot X_C$. Таким чином,

$$U = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_C^2} = I \sqrt{R^2 + X_C^2} ,$$

звідки

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} .$$

Введемо позначення $\sqrt{R^2 + X_C^2} = Z$, де Z – повний опір кола. Тоді формула закону Ома буде мати вигляд:

$$I = \frac{U}{Z} .$$

Оскільки повний опір кола Z визначається за теоремою Піфагора, то йому відповідає трикутник опорів (рис. 2.19).

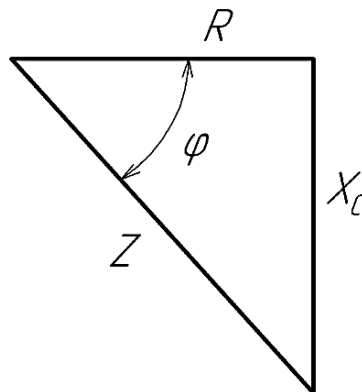


Рис. 2.19. Трикутник опорів для кола з резистором R та ємністю C

Розташування сторін трикутника опорів відповідає розташуванню сторін трикутника напруг на векторній діаграмі рис. 2.18. Зсув фаз ϕ в цьому випадку негативний, оскільки напруга відстає по фазі від струму [7]:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{X_C}{R} ,$$

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{-X_C}{R} .$$

2.7. Коло з активним опором, індуктивністю та ємністю

Коло з активним опором, індуктивністю та ємністю є випадком послідовного з'єднання активних і реактивних опорів та є послідовним коливальним контуром (рис. 2.20) [8].

Приймаємо початкову фазу струму нульовою $i = I_M \cdot \sin \omega t$. Тоді напруга на активному опорі $u_R = U_{RM} \sin \omega t$ співпадає по фазі зі струмом, напруга на

індуктивності $u_L = U_{LM} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ випереджає струм по фазі на кут $\pi/2$,

напруга на ємності $u_C = U_{CM} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ відстає від струму по фазі на кут $\pi/2$. Побудуємо векторну діаграму за умови $X_L > X_C$, тобто $U_L > U_C$ [8].

Вектор результуючої напруги $\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C$ замикає багатокутник векторів \bar{U}_R , \bar{U}_L , \bar{U}_C (рис. 2.21).

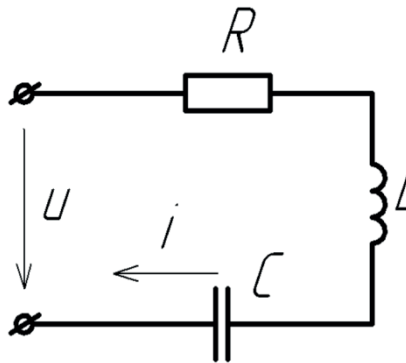


Рис. 2.20. Коло змінного струму з опором R , індуктивністю L та ємністю C

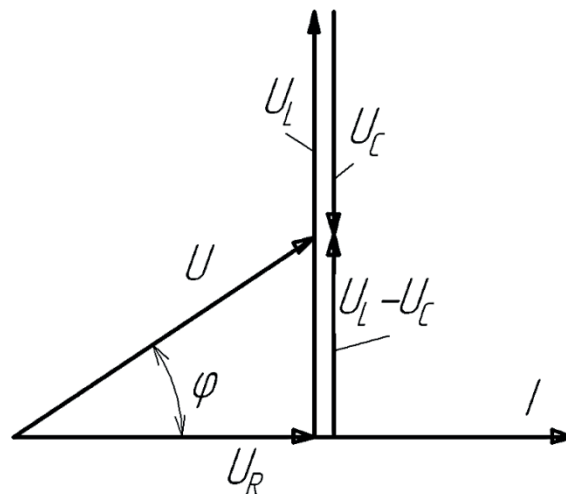


Рис. 2.21. Векторна діаграма для кола з опором R , індуктивністю L та ємністю C

Як видно з діаграми, ця напруга може бути меншою від напруги на кожній з ділянок окремо. Це пояснюється процесом обміну енергією між індуктивністю та ємністю [8].

Виведемо закон Ома для даного кола. З діаграми рис. 2.21 випливає, що

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} .$$

Але оскільки напруги $U_R = IR$; $U_L = IX_L$; $U_C = IX_C$,

відповідно:

$$U = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} .$$

Звідси

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} .$$

Введемо позначення

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} , \tag{2.9}$$

де Z – повний опір кола для загального випадку, коли в коло включені R , L та C , знайдемо

$$I = \frac{U}{Z} .$$

Різницю між індуктивним та ємнісним опором $X_L - X_C = X$ називають реактивним опором кола. Враховуючи це, отримаємо трикутник опорів для кола з R , L та C (рис. 2.22) [8].

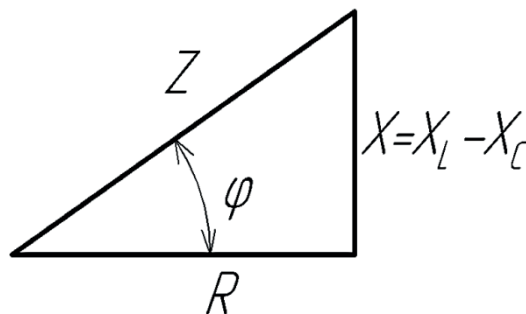


Рис. 2.22. Трикутник опорів для кола з резистором R , індуктивністю L та ємністю C

При $X_L > X_C$ реактивний опір додатній і опір кола має активно-індуктивний характер. При $X_L < X_C$ реактивний опір від’ємний і опір кола має активно-ємнісний характер [9].

З трикутника опорів кут зсуву фаз між струмом і напругою визначається так [8]:

$$\text{tg } \phi = \frac{X_L - X_C}{R} ,$$

$$\phi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} \quad (2.10)$$

2.8. Резонансний режим роботи кола змінного струму

В електричному колі, яке має одну або кілька індуктивностей та ємностей при певних умовах енергія електричного поля конденсатора переходить в енергію магнітного поля котушки індуктивності та навпаки. В колі відбуваються незгасаючі коливання енергії, тому воно отримало назву коливального контуру. Режим роботи кола, при якому його опір є чисто активним, називається резонансним режимом. По відношенню до джерела живлення електричне коло поводить себе в резонансному режимі як активний опір, тому струм і напруга співпадають по фазі. Реактивна потужність кола при цьому дорівнює нулю. Розрізняють два режими: резонанс напруг і резонанс струмів [9, 10].

2.8.1. Резонанс напруг

Резонансом напруг називають явище в електричному колі з послідовним контуром, коли струм у ньому збігається по фазі з напругою джерела [9].

На рис. 2.23 приведена схема послідовного коливального контуру.

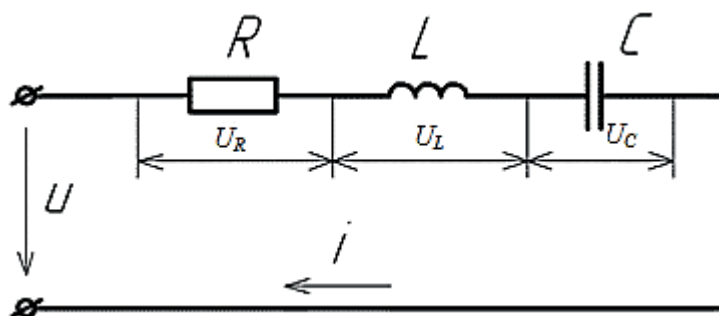


Рис. 2.23. Послідовний коливальний контур

Знайдемо умови резонансу напруг. Для того, щоб струм в колі збігався по фазі з напругою, реактивний опір кола має дорівнювати нулю. З (2.10) $\phi = 0$ при умови $X_L = X_C$. Але $X_L = 2\pi fL$, а $X_C = 1/(2\pi fC)$, де f – частота джерела живлення. В результаті можна записати [8]:

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

Розв'язавши це рівняння відносно f , отримаємо:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.11)$$

При резонансі напруг частота джерела дорівнює власній частоті коливань контуру, яка визначається формулою Томсона (2.11) і залежить від параметрів L і C [8].

При резонансі напруг будемо мати таку векторну діаграму (рис. 2.24).

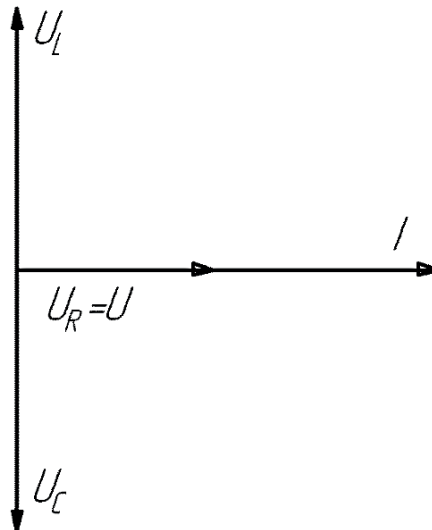


Рис. 2.24. Векторна діаграма при резонансі напруг

На основі цієї діаграми і закону Ома для кола з R , L і C сформулюємо ознаки резонансу напруг [8]:

- а) опір електричного кола $Z = R$ мінімальний і чисто активний;
- б) струм в колі збігається по фазі з напругою джерела і досягає максимального значення;
- в) напруга на індуктивній котушці дорівнює напрузі на конденсаторі і кожна окремо може у багато разів перевищувати напругу джерела.

Фізично це пояснюється тим, що напруга джерела при резонансі йде тільки на покриття втрат у контурі. Напруга на котушці та конденсаторі зумовлена накопиченою в них енергією, значення якої тим більше, чим менші втрати в колі. Здатність коливального контуру виділяти струми резонансних частот і послаблювати струми інших частот характеризується резонансною кривою (рис. 2.25) [8].

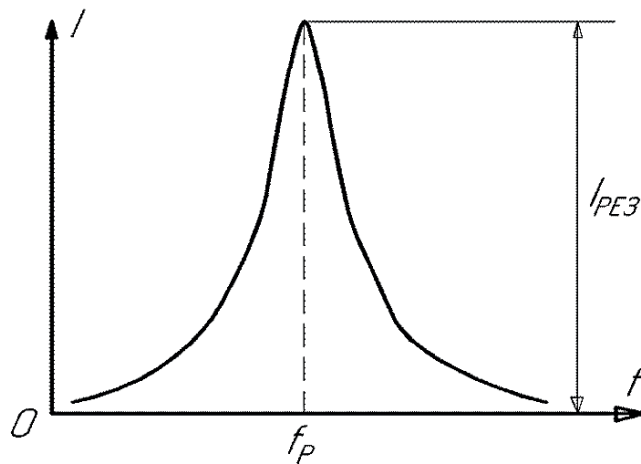


Рис. 2.25. Резонансна крива послідовного контуру

Резонансна крива показує залежність діючого значення струму в контурі від частоти джерела при незмінній власній частоті контуру [8].

З кривої рис. 2.25 видно, що інтенсивні коливання струму в контурі виникають тільки при частоті, близькій до частоти власних коливань контуру, що розраховується за формулою (2.11). Можна сказати, що контур пропускає коливання певного діапазону частот. Цю властивість характеризують смугою пропускання контуру.

Існує кілька шляхів досягнення явища резонансу в коливальному контурі, тобто досягнення умови $X_L = X_C$ [11]:

зміна величини індуктивності L ;

зміна величини ємності C ;

зміна частоти напруги живлення f .

Резонанс напруг широко використовується в радіотехніці та електроніці для виділення сигналів заданої частоти.

2.8.2. Аналіз резонансу струмів

Резонансом струмів називається таке явище в колі з паралельним коливальним контуром, коли струм у нерозгалуженій частині кола збігається по фазі з напругою джерела [9].

На рис. 2.26 приведено схему паралельного коливального контуру. Коло складається з паралельно з'єднаних котушки індуктивності та конденсатора, які перебувають під загальною напругою. Опір R в індуктивному колі зумовлений тепловими втратами на активному опорі провідників котушки.

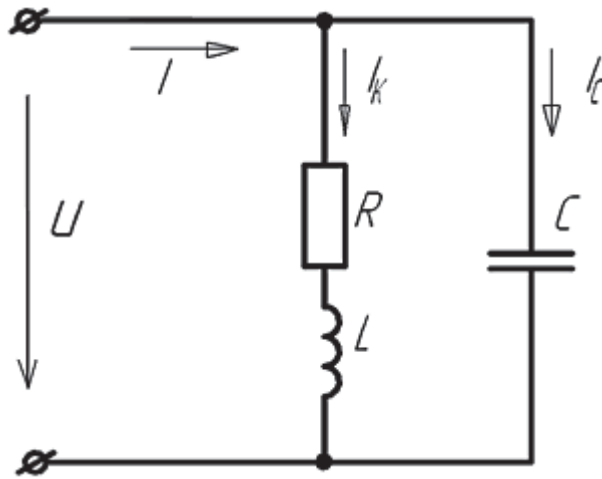


Рис. 2.26. Схема паралельного коливального контуру

Умовою резонансу струмів є збіг по фазі загального струму I та напруги U джерела живлення. Отже, опір контуру має бути чисто активним, а реактивні опору віток повинні бути рівні $X_L = X_C$ [9].

Струм у котушці

$$I_K = \frac{U}{Z_K} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

Цей струм відстає по фазі від напруги на кут φ , який визначається так:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$$

Струм котушки можна розкласти на дві складові, активну I_{RK} , яка збігається по фазі з напругою, і реактивну I_{LK} , яка відстає по фазі від напруги на кут $\pi/2$ [10].

Струм конденсатора

$$I_2 = \frac{U}{X_C}$$

Він випереджає по фазі напругу на кут $\pi/2$ [9].

Для вивчення властивостей резонансу побудуємо векторну діаграму, представлену на рис. 2.27.

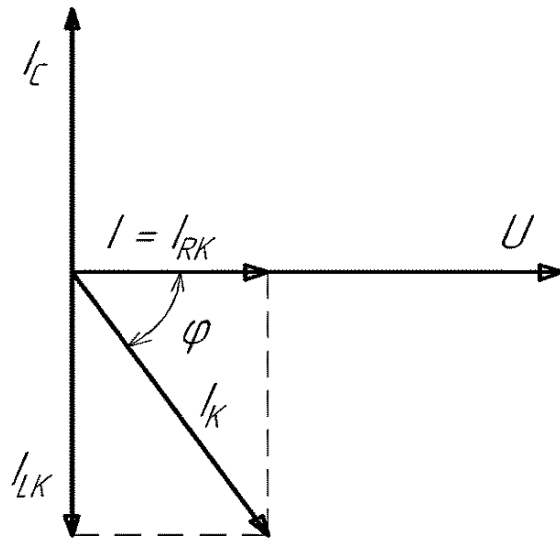


Рис. 2.27. Векторна діаграма при резонансі струмів

На основі цієї діаграми та закону Ома для кола з R , L і C запишемо властивості резонансу напруг [9]:

- а) опір електричного кола $Z = R$ мінімальний і чисто активний;
- б) струм у колі збігається по фазі з напругою джерела та досягає мінімального значення;
- в) струм в індуктивній котушці дорівнює струму в конденсаторі, а кожен окремо може в багато разів перевищувати струм джерела.

Фізично це пояснюється тим, що струм в контурі зумовлений обміном енергією між котушкою і конденсатором [11].

Явище резонансу струмів широко застосовується в електроенергетиці для підвищення коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$) підприємств. Більшість приймачів промислових підприємств це електродвигуни, трансформатори та інші електромагнітні апарати. При роботі цих пристроїв виникає індуктивна реактивна складова струму, яка визначає реактивну потужність приймача та погіршує коефіцієнт потужності [12].

Для підвищення коефіцієнта потужності необхідно компенсувати індуктивну реактивну складову струму ємнісною реактивною складовою струму. Для цього включають, наприклад, паралельно до двигунів батарею конденсаторів, параметри якої забезпечують резонанс струмів [13].

2.9. Потужність у колах змінного струму

2.9.1. Розрахунок потужності в колах змінного струму

Потужність у колах змінного струму також є змінною величиною. Її миттєве значення дорівнює:

$$P = u \cdot i$$

Оскільки $i = I_M \sin \omega t$, а $u = U_M \sin(\omega t + \phi)$, то

$$P = U_M I_M \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

Після тригонометричних перетворень одержимо:

$$P = UI \cos \phi - UI \cos(2\omega t + \phi) \quad (2.12)$$

З рівняння (2.12) випливає, що миттєва потужність складається з постійної складової потужності $UI \cos \phi$ і змінної складової $- UI \cos(2\omega t + \phi)$, яка змінюється синусоїдально з подвійною частотою.

Активна потужність. Середня за період потужність, що застосовується зазвичай при розрахунках, або активна потужність P , для цього кола характеризує витрату енергії на активному опорі, і дорівнює постійній потужності $P = UI \cos \phi$. Вона перетворюється в інші види енергії: теплову, механічну тощо. Одиниці вимірювання вати, [Вт] [14].

Реактивна потужність. Реактивна потужність Q характеризує інтенсивність обміну енергією між джерелом і реактивними елементами кола. Енергія джерела віддається на створення електричного поля конденсатора та магнітного поля котушки індуктивності. За один період змінного струму енергія двічі віддається джерелом і двічі воно отримує її назад від реактивних споживачів кола [14]:

$$Q = I^2(X_L - X_C) = UI \sin \phi$$

Одиниці вимірювання реактивної потужності вольт-ампери реактивні, [Вар].

Повна потужність. Поняття повної потужності застосовують для оцінки граничної потужності електричних машин [14].

Активна, реактивна та повна потужності графічно зображуються сторонами прямокутного трикутника потужностей (рис. 2.28). Трикутник потужностей можна отримати, помноживши на струм сторони трикутника напруг (рис. 2.21).

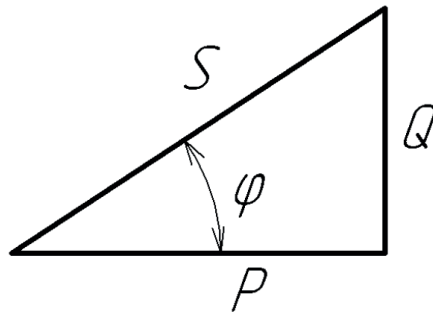


Рис. 2.28. Трикутник потужностей

З трикутника потужностей за теоремою Піфагора повна потужність дорівнює:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Підставивши значення P та Q одержимо:

$$S = \sqrt{(UI)^2 (\cos \phi)^2 + (UI)^2 (\sin \phi)^2}$$

$$S = UI \sqrt{(\cos \phi)^2 + (\sin \phi)^2}$$

Оскільки $(\cos \phi)^2 + (\sin \phi)^2 = 1$, то одержимо

$$S = UI$$

Одиницею вимірювання повної потужності є вольт-ампер [ВА] [14].

2.9.2. Визначення коефіцієнту потужності

З трикутника потужностей (рис. 2.27) відношення активної потужності до повної становить:

$$\frac{P}{S} = \cos \phi$$

і отримало назву коефіцієнта потужності. В усій силовій техніці, а особливо при передачі електроенергії, прагнуть до того, щоб коефіцієнт потужності $\cos \phi$ був якомога ближчий до одиниці [14].

Номінальний струм I_n електричної машини, трансформатора або електромагнітного апарату визначається виходячи з умов допустимого нагріву його обмоток, а номінальна напруга U_n – з умов допустимого нагріву магнітопроводу. Таким чином, номінальний струм і номінальна напруга є гранично допустимими при експлуатації. Тому найбільшу активну потужність генератор може розвивати при значенні $\cos \phi = 1$. У цьому випадку активна

потужність максимальна і дорівнює номінальній повній потужності:

$$P_n = U_n I_n \cos \phi = U_n I_n = S_n$$

У цьому випадку генератор використовується найбільш ефективно, оскільки його активна потужність дорівнює номінальній повній потужності S_n .

Зі зменшенням $\cos \phi$ активна потужність, яка розвивається генератором зменшується пропорційно $\cos \phi$.

Коефіцієнт потужності генератора (електростанції) залежить від споживача, тому директивними вказівками встановлений коефіцієнт потужності (0,9-0,92) до якого має прагнути кожне промислове підприємство. Якщо коефіцієнт потужності підприємства буде нижчим встановленого, то для підприємства вводиться надбавка до тарифу за електроенергію. Якщо коефіцієнт потужності підприємства буде вищим встановленого, то для таких підприємств встановлюється знижка до тарифу за електроенергію [14].

У найбільш поширеного у промисловості приводу трифазного асинхронного двигуна значення $\cos \phi$ коливається в межах 0,1-0,3 при холостому ході та 0,8-0,85 при номінальному навантаженні.

Для підвищення коефіцієнта потужності можна [14]:

- 1) збільшити навантаження двигунів і підтримувати її близькою до номінальної;
- 2) замінити слабо навантажені двигуни двигунами меншої потужності, для того, щоб вони працювали з навантаженням близьким до номінального;
- 3) включити паралельно до двигунів батарею конденсаторів. При цьому відбудеться часткова або повна компенсація реактивної індуктивної складової струму двигуна реактивним ємнісним струмом конденсатора (явище резонансу струмів).

Підвищення $\cos \phi$ електричних установок є важливою техніко-економічною проблемою, оскільки підвищення $\cos \phi$ означає значну економію електричної енергії, зумовлену зменшенням втрат, і краще використання потужності генераторів і всіх ланок передачі енергії [14].

2.10. Технологія отримання трифазної ЕРС. Основні схеми з'єднання трифазних кіл

Три синусоїдальних ЕРС однаковою частоти та амплітуди, зсунуті по фазі на 120° , утворюють трифазну симетричну систему [15].

Трифазна система змінного струму отримала широке поширення через такі причини:

- 1) вона забезпечує економнішу передачу електричної енергії на великі відстані по лініях електропередач (ЛЕП) у порівнянні з однофазною;
- 2) дозволяє створити прості за будовою і надійні в експлуатації генератори, двигуни (рис. 2.29) і трансформатори (рис. 2.30).

Окремі кола трифазної системи називаються фазами. Трифазну систему електричних кіл, з'єднаних одне з одним, називають трифазним колом. На рис. 2.31 приведена схема найпростішого трифазного генератора, за допомогою якої легко пояснити принцип отримання трифазної ЕРС [15].

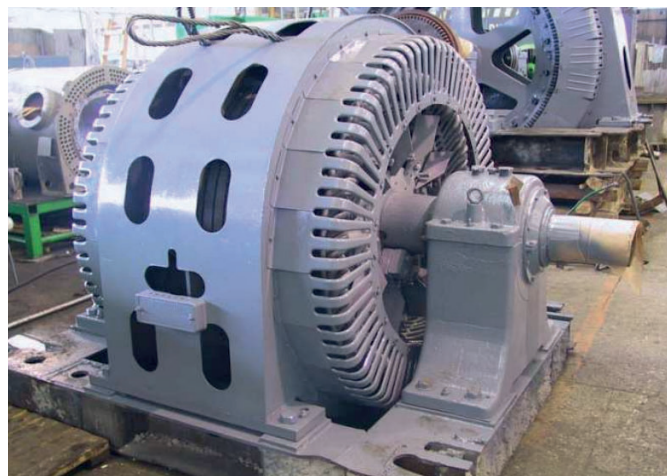


Рис. 2.29. Синхронний трифазний двигун



Рис. 2.30. Силовий трифазний трансформатор

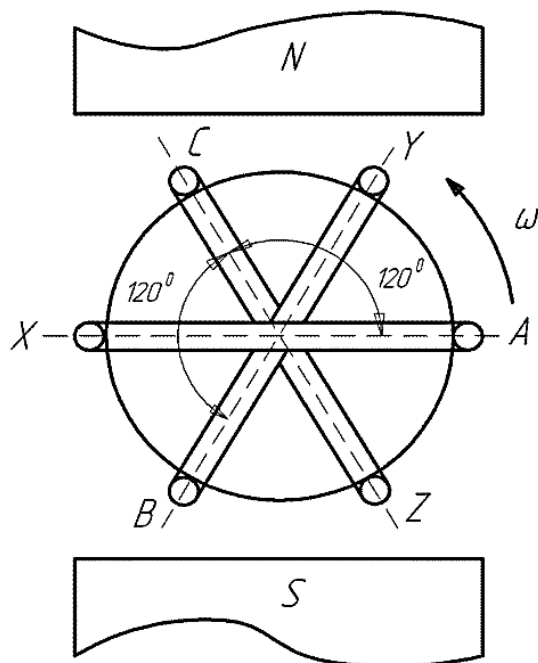


Рис. 2.31. Найпростіший трифазний генератор

В однорідному магнітному полі постійного магніту обертаються з постійною кутовою швидкістю ω три однакових обмотки (фази), початки та кінці яких позначаються відповідно буквами A, B, C і X, Y, Z . Осі обмоток зсунуті в просторі одна відносно іншої на рівні кути $2\pi/3$, або 120° . Тому, ЕРС, які індукуються в обмотках з однаковими амплітудами, зсунуті по фазі одна відносно другої на кути 120° . Така система трьох ЕРС називається симетричною. Навпаки, при нерівності амплітуд ЕРС або нерівності кутів зсуву між ними система ЕРС буде несиметричною [15].

У реальному трифазному генераторі три нерухомих обмотки розміщують на статорі, а магнітне поле, індукція якого розподілена за синусоїдальним законом, створюється обертовим ротором.

Прийнявши за початок відліку часу ($t = 0$) початок періоду ЕРС у першій фазі (A), отримаємо її вираз;

$$e_A = E_M \sin \omega t.$$

Електрорушійна сила другої фази (B) відстає від ЕРС першої фази e_A на $1/3$ періоду, тому:

$$e_B = E_M \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

Електрорушійна сила третьої фази (C) відстає від ЕРС першої фази e_A на $2/3$ періоду, тому її вираз має вигляд:

$$e_C = E_M \sin(\omega t - \pi/3)$$

На рис. 2.32 і рис. 2.33 представлені графіки миттєвих значень ЕРС E_A , E_B , E_C при симетричному навантаженні та векторна діаграма трифазної системи ЕРС.

Трифазний генератор, з'єднаний проводами з трифазним споживачем, утворює трифазне коло. У трифазному колі протікає трифазна система струмів з трьома різними фазами. Ділянка кола, по якій протікає один зі струмів, називається фазою трифазного кола. Обмотки трифазного трансформатора з'єднують зіркою або трикутником. При цьому число з'єднувальних проводів може бути три або чотири. На електричних схемах трифазний генератор прийнято зображати у вигляді трьох обмоток, розташованих під кутом 120° одна до одної. Початки обмоток позначаються літерами A , B , C . Кінці обмоток позначаються літерами X , Y , Z [16].

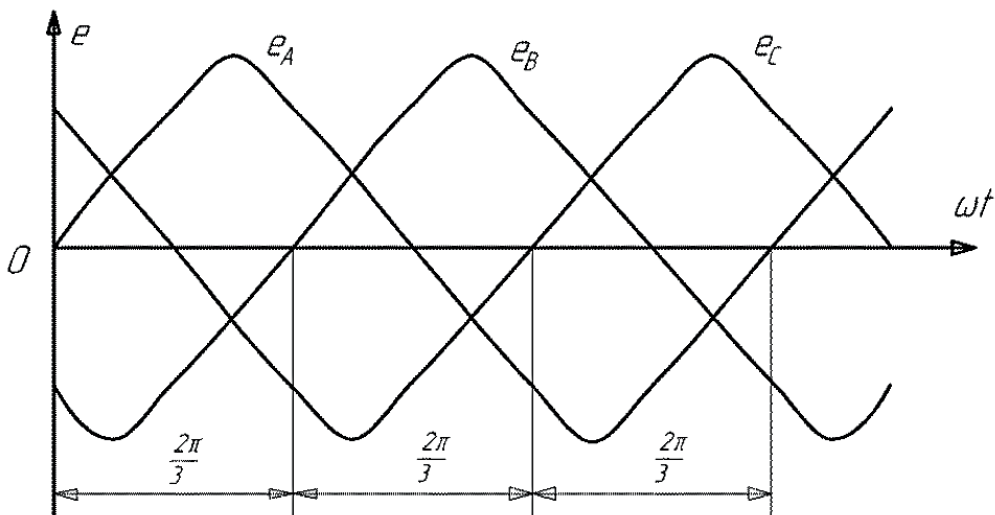


Рис. 2.32. Графік симетричних ЕРС трифазної системи

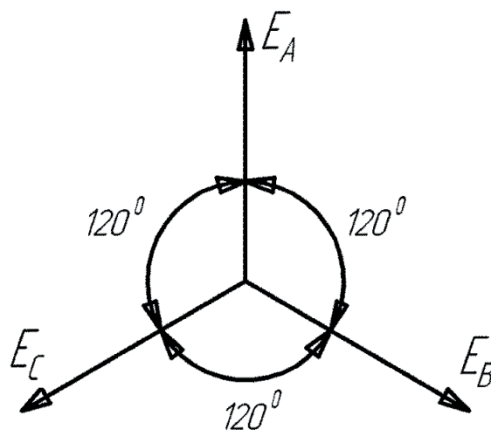


Рис. 2.33. Векторна діаграма симетричних ЕРС

При з'єднанні зіркою (рис. 2.34) кінці цих обмоток об'єднують в одну точку, яку називають нульовою точкою (або нейтральною) і позначають буквою O [17].

При з'єднанні обмоток трикутником (рис. 2.35) кінець першої обмотки з'єднують з початком другої, кінець другої обмотки з початком третьої, кінець третьої – з початком першої. До точок A, B, C приєднують дроти з'єднувальної лінії [18].

Відзначимо, що при відсутності навантаження струм в обмотках такого з'єднання відсутній, оскільки геометрична сума ЕРС E_A, E_B, E_C дорівнює нулю.

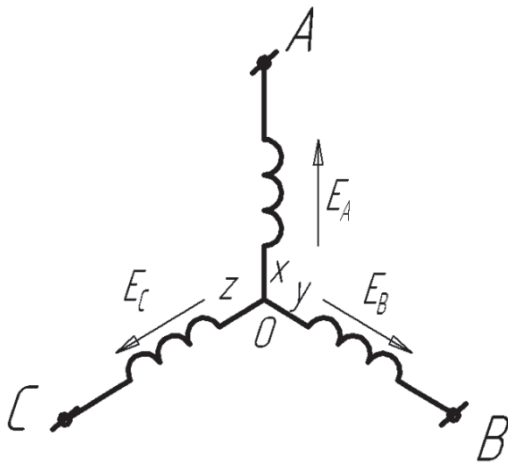


Рис. 2.34. Схема обмоток генератора, з'єднаних зіркою

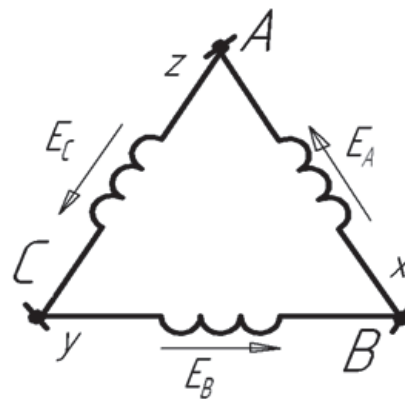


Рис. 2.35. Схема обмоток генератора, з'єднаних трикутником

2.11. З'єднання трифазного кола зіркою

Розглянемо з'єднання генератора, зібраного за схемою зірка, з навантаженням, включеним зіркою (рис. 2.36) [17].

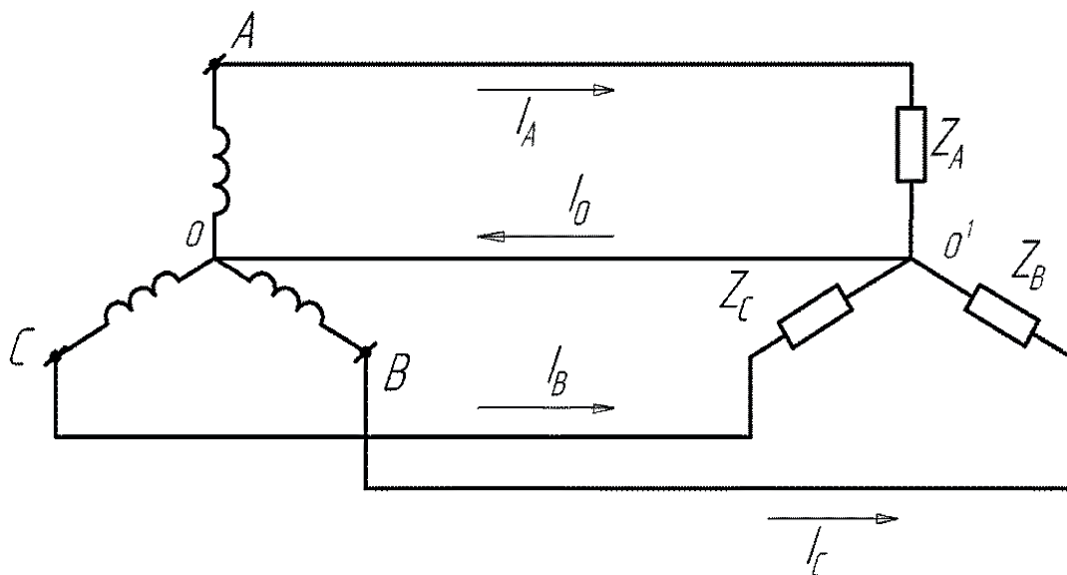


Рис. 2.36. Схема трифазного електричного кола з нульовим проводом

Провід OO_1 називається нульовим або нейтральним. Відповідно до першого закону Кірхгофа вектор струму в нульовому проводі:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$$

При симетричному навантаженні, коли повні опори $Z_A = Z_B = Z_C$ рівні між собою і мають однаковий характер, вектори струмів I_A, I_B, I_C , рівні за абсолютним значенням та утворюють трипроменеву зірку, в якій кути між променями дорівнюють 120° . З геометричної побудови, показаної на рис. 2.37 випливає, що в цьому випадку векторна сума струмів дорівнює нулю:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0$$

Таким чином, при симетричному навантаженні нейтральний провід не потрібен. Отримуємо схему трифазного кола, яка зображена на рис. 2.38.

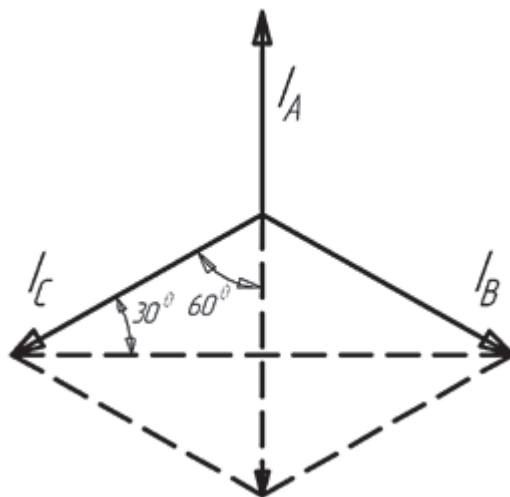


Рис. 2.37. Векторна діаграма струмів у трифазному колі при симетричному навантаженні

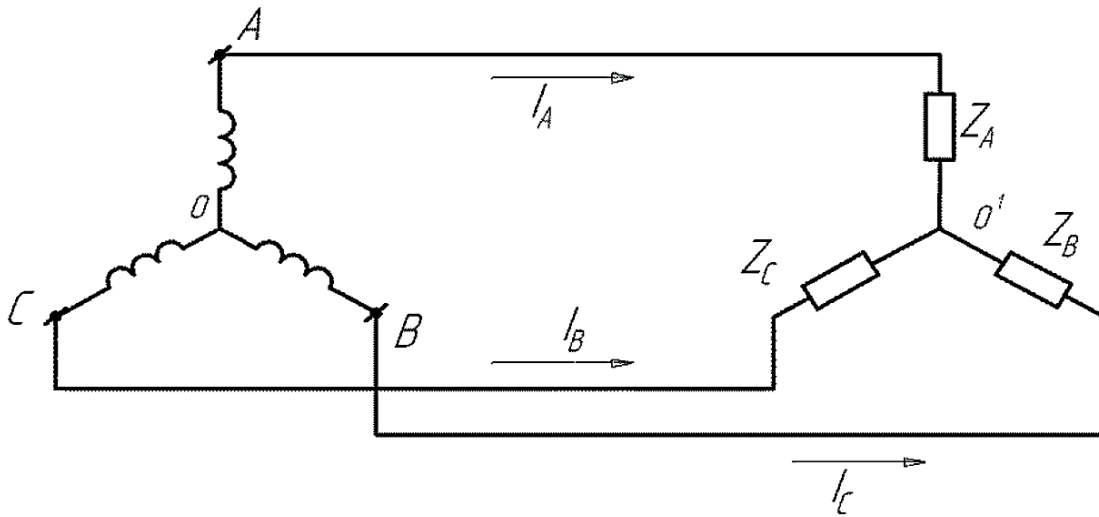


Рис. 2.38. Схема трифазного трипровідного кола

2.12. Співвідношення між фазними і лінійними напругами та струмами при з'єднанні зіркою

Система ЕРС обмоток трифазного генератора, який працює в енергосистемі, завжди симетрична: ЕРС підтримуються сталими по амплітуді і зсунутими по фазі на 120° [18].

Розглянемо симетричне навантаження (рис. 2.39) для котрої:

$$Z_A = Z_B = Z_C, \quad \phi_A = \phi_B = \phi_C$$

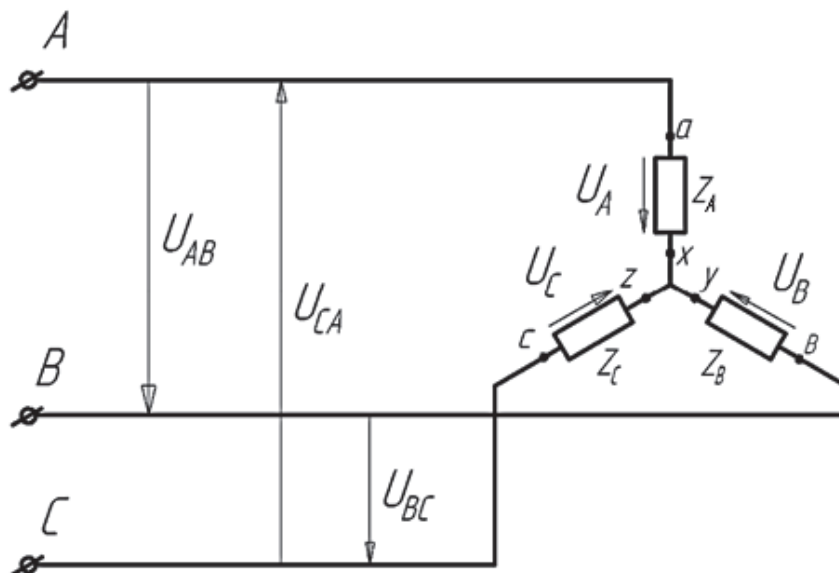


Рис. 2.39. З'єднання навантаження зіркою

До затискачів A, B, C підходять дроти лінії електропередачі – лінійні дроти.

Введемо позначення: I_l – лінійний струм у проводах електропередач; I_ϕ – фазний струм, струм в опорах (фазах) навантаження; U_l – лінійна напруга між лінійними проводами; U_ϕ – фазна напруга на фазах навантаження. У розглянутій схемі лінійні та фазні струми збігаються: $I_l = I_\phi$.

Напруги U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} є лінійними, а напруги U_A , U_B , U_C – фазними.

Встановимо співвідношення між лінійними та фазними напругами при з'єднанні зіркою. Оскільки кінець першої фази X з'єднаний не з початком другої фази, а з її кінцем Y , то значення лінійної напруги U_{AB} між проводами A і B відповідно до другого закону Кірхгофа дорівнюватиме різниці відповідних фазних напруг, тобто [18]:

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A + \bar{U}_B$$

Аналогічно значення інших ліній:

$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_B + \bar{U}_C$$

$$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_C + \bar{U}_A$$

Векторну діаграму, що відповідає цим рівнянням (рис. 2.40), починаємо будувати із зображення зірки фазних напруг U_A , U_B , U_C . Потім будуємо вектор U_{AB} – як геометричну суму векторів U_A та $-U_B$, вектор U_{BC} – як геометричну суму U_B та $-U_C$, вектор U_{CA} – як геометричну суму векторів U_C та $-U_A$.

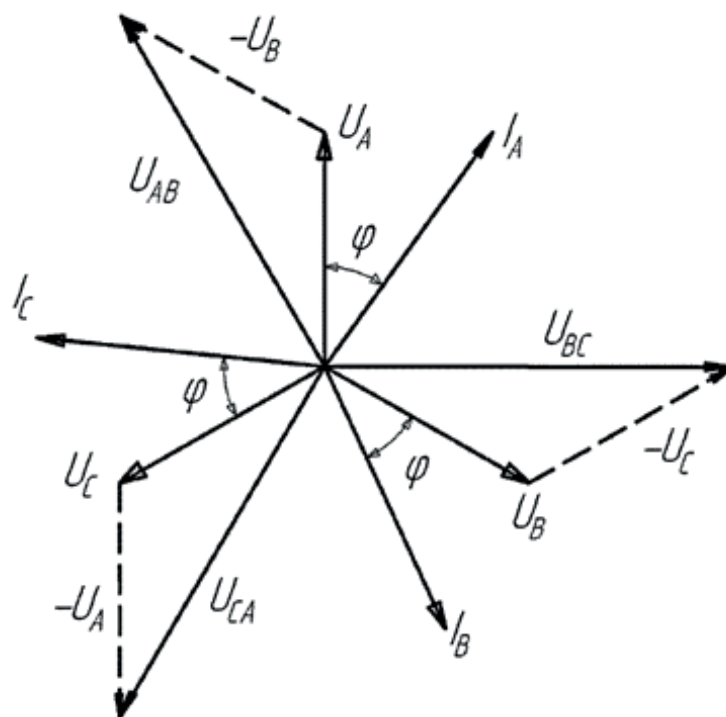


Рис. 2.40. Полярна векторна діаграма напруг [18]

Щоб картина була максимально повною, на векторній діаграмі зображено вектори струмів, які відстають на кут φ від векторів відповідних фазних напруг (навантаження вважаємо індуктивним).

На побудованій векторній діаграмі початки всіх векторів суміщені в одній точці (полюсі), тому її називають полярною.

Рівняння, яке пов'язує вектори лінійних і фазних напруг, задовольнятиме також векторна діаграма приведена на рис. 2.41, яку називають топографічною.

Якщо навантаження симетричне, то модулі векторів фазних напруг рівні між собою: $U_A = U_B = U_C = U_\phi$, модулі лінійних напруг є рівними між собою:

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} .$$

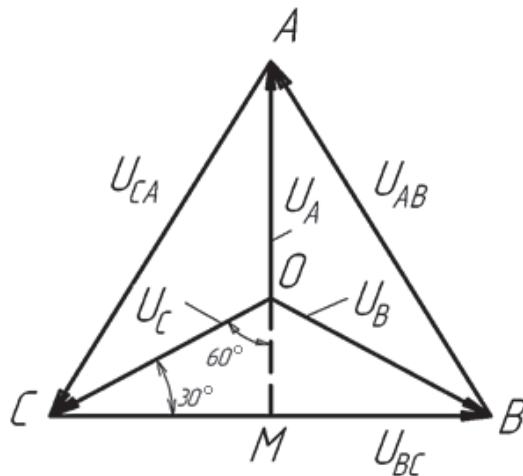


Рис. 2.41. Топографічна векторна діаграма фазних і лінійних напруг при симетричному навантаженні [19]

У трикутнику COB проведемо перпендикуляр OM до сторони CB. Тоді, з прямокутного трикутника CMO знаходимо катет CM:

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

звідки

$$U_l = \sqrt{3} U_\phi .$$

У симетричній зірці фазні та лінійні напруги пов'язані співвідношеннями:

$$I_l = I_\phi ,$$

$$U_l = \sqrt{3} U_\phi .$$

2.13. Призначення нульового проводу в чотирьохпроводних колах

Струм у нульовому проводі дорівнює нулю при строго симетричному навантаженні. Якщо навантаження несиметрична, тобто $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$, то нерівними будуть і струми $I_A \neq I_B \neq I_C$. Тоді на основі побудови, аналогічної до наведеної на рис. 2.40, неважко переконатися, що при симетрії фазних напруг струм у нульовому проводі не дорівнює нулю $I_0 \neq 0$. Уявімо собі, що нульовий провід обірвався: $I_0 = 0$. При цьому струми I_A, I_B, I_C повинні змінитися так, щоб їх векторна сума дорівнювала нулю [19]:

$$I_A + I_B + I_C = 0.$$

Але при заданих опорах навантаження Z_A, Z_B, Z_C струми можуть змінитися тільки за рахунок зміни фазних напруг. Отже, обрив нульового проводу призводить до зміни фазних напруг, симетричні фазні напруги стають несиметричними [20].

Розглянемо топографічну векторну діаграму, представлену на рис. 2.42.

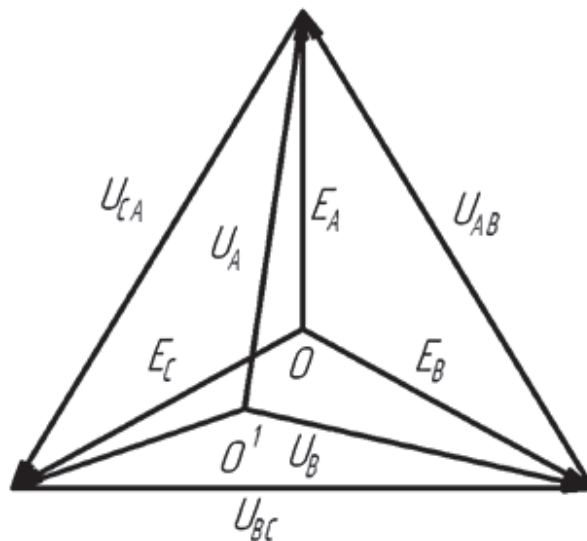


Рис. 2.42. Топографічна векторна діаграма ЕРС і напруг трифазного кола при відсутності нульового проводу

Для спрощення знехтуємо спадом напруги всередині обмоток генератора та проводах лінії і будемо вважати, що напруги на навантаженні рівні ЕРС генератора.

При несиметричному навантаженні і відсутності нульового проводу фазні напруги U_A, U_B, U_C будуть різними і точка O_1 займе на векторній діаграмі положення, відмінне від точки O .

Введемо нульовий провід, як показано на рис. 2.36. При тому потенціали

точок O та O_1 виявляться однаковими. Це означає, що точки O і O_1 на топографічній діаграмі рис. 2.42 повинні співпадати.

Точка O на топографічній діаграмі не може змінювати свого положення, оскільки симетрія ЕРС E_A, E_B, E_C забезпечується конструкцією генератора. Отже точка O_1 перейде в точку O , тобто фазні напруги на навантаженні стануть симетричними.

Таким чином, нульовий провід в колі призначений для забезпечення симетрії фазних напруг при несиметричному навантаженні [20].

Несиметрія фазних напруг неприпустима, оскільки призводить до порушення нормальної роботи споживачів, розрахованих на певну робочу напругу.

2.14. Розрахунок з'єднання навантаження трикутником

Трикутником можуть бути з'єднані як обмотки генератора, так і фази навантаження. При з'єднанні трикутником (рис. 2.43) Кожна фаза приймача підключається до лінійних проводів, що йдуть від генератора [16-18].

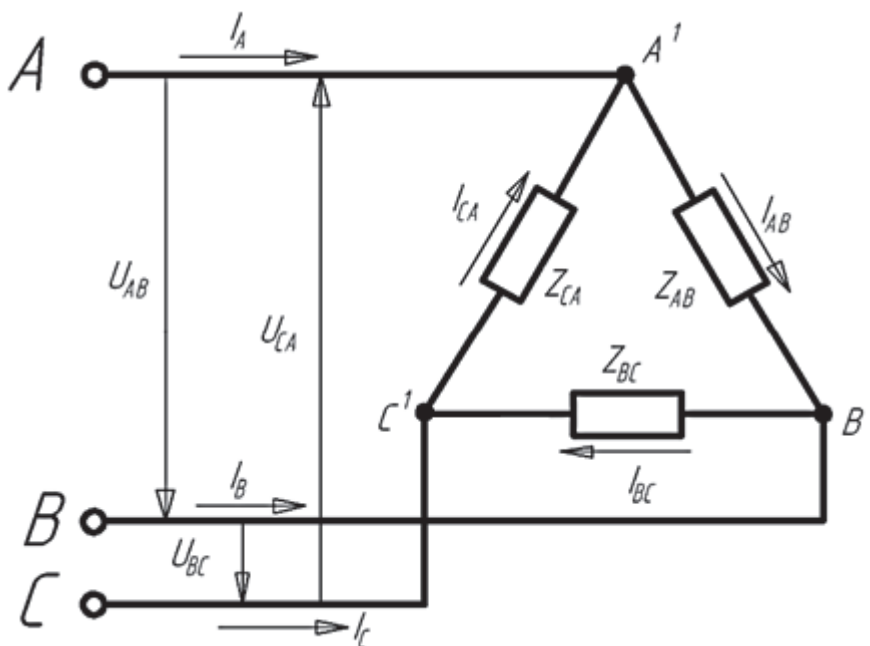


Рис. 2.43. З'єднання навантаження трикутником

При цьому кожна фаза приймача безпосередньо включається на лінійну напругу, в той же час будучи фазною напругою, тобто

$$U_A = U_{AB} ; U_B = U_{BC} ; U_C = U_{CA} .$$

У цій схемі фазні напруги (на відміну від схеми з'єднання зіркою) не залежать від величини опору фаз приймача.

За додатній напрям фазних струмів вибираємо напрямок від A' до B' , від B' до C' і від C' до A' . За додатній напрям лінійних струмів приймаємо напрям від генератора до приймача.

За першим законом Кірхгофа для точки A' можна записати:

$$I_A + I_{CA} - I_{AB} = 0 ,$$

звідки:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} .$$

Аналогічно для точки B' :

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

і для точки C' :

$$I_C = I_{CA} - I_{BC} .$$

Цим рівнянням задовольняє векторна діаграма, представлена на рис. 2.44.

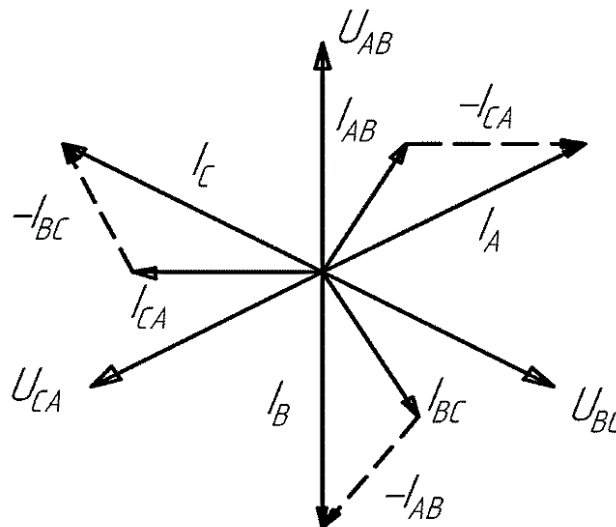


Рис. 2.44. Векторна діаграма напруг і струмів при з'єднанні навантаження трикутником

Для повної картини на векторній діаграмі зображаємо також вектори струмів, які відстають на кут φ від векторів відповідних фазних напруг (вважаємо навантаження індуктивним) [18].

При симетричному навантаженні

$$I_A = I_B = I_C = I_\ell ; \quad I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\phi .$$

З трикутника фазних і лінійних струмів (рис. 2.45) знаходимо:

$$I_{\text{л}} = 2I_{\phi} \cos 30^{\circ} = 2I_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_{\phi}$$

Таким чином, при з'єднанні трикутником

$$U_{\text{л}} = U_{\phi} , \quad I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi}$$

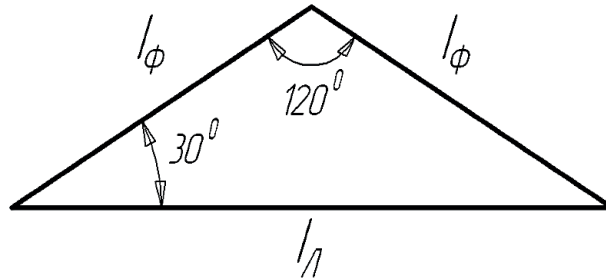


Рис. 2.45. Визначення співвідношень між струмами при з'єднанні навантаження трикутником

2.15. Активна, реактивна та повна потужності трифазного кола.

Коефіцієнт потужності

Активна потужність трифазного кола дорівнює сумі активних потужностей її фаз [17]:

$$P = P_A + P_B + P_C$$

Реактивна потужність трифазного кола дорівнює сумі реактивних потужностей її фаз [18]:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C$$

Очевидно, що в симетричному трифазному колі

$$P_A + P_B + P_C = P_{\phi} , \quad Q_A + Q_B + Q_C = Q_{\phi} ,$$

тоді

$$P = 3P_{\phi} , \quad Q = 3Q_{\phi}$$

Потужність однієї фази визначається за формулами для однофазного кола:

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \phi , \quad Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \phi$$

Ці формули можна використовувати для розрахунку потужності симетричного трифазного кола. Однак вимірювання фазних напруг і струмів пов'язані з деякими труднощами, оскільки необхідний доступ до нульової точки, яка не завжди має спеціальний вивід і є всередині машини. Простіше виміряти лінійні струми та напруги безпосередньо на клеммах щитка живлення.

Тому формули потужності трифазної системи записують через лінійні струми і напруги.

При з'єднанні зіркою [16]:

$$P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \phi = 3 \frac{U_{\ell}}{\sqrt{3}} I_{\ell} \cos \phi = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \cos \phi$$

При з'єднанні трикутником [17]:

$$P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \phi = 3 \frac{U_{\ell}}{\sqrt{3}} I_{\ell} \cos \phi = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \cos \phi$$

Таким чином, в обох випадках активна потужність симетричного кола

$$P = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \cos \phi$$

Аналогічно реактивна потужність:

$$Q = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \sin \phi$$

Повна потужність:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell}$$

Коефіцієнт потужності симетричного трифазного кола знаходять як відношення активної та повної потужностей [18]:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell}}$$

РОЗДІЛ 3. ТРАНСФОРМАТОРИ

3.1. Трансформатори та їх призначення

Трансформатором називають статичний електромагнітний пристрій, який призначений для перетворення електричної енергії змінного струму з одними параметрами в електричну енергію з іншими параметрами. Трансформатори дозволяють передавати потужність від джерела до приймача при різних напругах і струмах [21].

Перші трансформатори з розімкнутим магнітопроводом запропонував у 1876 р. П.Н. Яблочков, який застосував їх для живлення електричної «свічки». У 1885 р. угорські вчені М. Дері, О. Блаті та К. Ціперовський розробили однофазні трансформатори з замкнутим магнітопроводом. У 1889-1891 рр. М.О. Доліво-Добровольський сконструював трифазний трансформатор [22].

Трансформатори використовуються для перетворення електричної енергії при її передачі на відстані. На електростанції електрична енергія виробляється за допомогою синхронних генераторів напругою від 6 до 35 кВ. При передачі такої напруги на великі відстані будуть великі втрати потужності в лініях електропередач (ЛЕП). Ці втрати пропорційні квадрату струму. Для зменшення втрат зменшують силу струму за рахунок збільшення напруги. Тому, на виході електростанції встановлюють трансформаторні підстанції, на яких напруга підвищується до величини 750-1150 кВ. Перед населеними пунктами встановлюють понижувальні трансформаторні підстанції. Трансформатор розрахований на нормальну роботу тільки при певних значеннях частоти, потужності, струмів і напруг, які називають номінальними (вказаними на електричному щитку). Номінальна потужність трансформаторів є різною. У радіоелектронних пристроях є трансформатори, потужність яких становить десятки вольт-ампер. Потужність одного трифазного трансформатора для ліній електропередач становить 1 млн. кВА [23].

Трансформатори використовуються також у вторинних джерелах електроживлення та в різних електронних схемах [24].

3.2. Принцип роботи трансформатора

Трансформатор складається із замкнутого осердя, на якому розташовані обмотки первинної та вторинної напруги. Трансформатор зазвичай має одну

первинну та одну або кілька вторинних обмоток. Розглянемо трансформатор з однією вторинною обмоткою (рис. 3.1) [23].

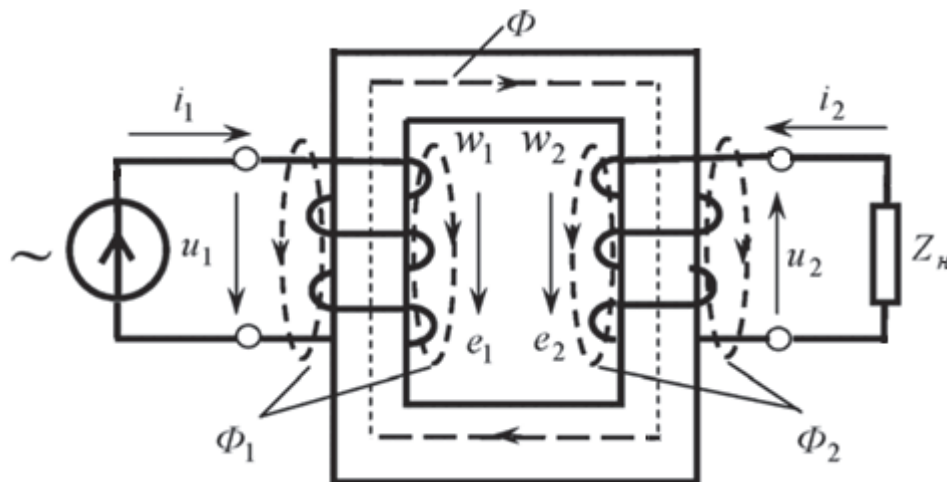


Рис. 3.1. Трансформатор з однією вторинною обмоткою (w_1, w_2 – відповідно кількість витків первинної та вторинної обмоток)

На первинну обмотку прикладається змінна напруга u_1 , під дією якої в первинній обмотці тече струм i_1 . Добуток $i_1 w_1$ є намагнічуючою силою первинної обмотки, яка визначає величину магнітного потоку Φ_1 . Цей потік, зчеплений з двома обмотками трансформатора, індукує в них ЕРС, миттєві значення якої будуть [23]:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}, \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}.$$

ЕРС e_1 частково компенсує прикладену напругу u_1 , e_2 створює напругу u_2 на контактах вторинної обмотки. При замиканні вторинної обмотки на навантаження з опором Z_n , по ній протікає струм i_2 . Намагнічуюча сила $i_2 w_2$ збуджує змінний магнітний потік Φ_2 , який напрямлений назустріч магнітному потоку Φ_1 (розмагнічує його). Таким чином, під навантаженням у магнітопроводі протікає результуючий магнітний потік

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_1 + \bar{\Phi}_2.$$

Оскільки магнітний потік Φ_2 напрямлений назустріч, то загальний магнітний потік Φ зменшується. Це викликає зменшення ЕРС e_1 та збільшення струму i_1 за рахунок різниці сили струму живлення та ЕРС e_1 . Збільшення струму призводить до компенсації зміни загального магнітного потоку та, відповідно, підтримки струму i_1 . Таким чином, встановлюється новий робочий режим.

У трансформаторі, який працює під навантаженням, ЕРС первинної та вторинної обмотки індукуються сумарним магнітним потоком [24]:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad ,$$

а їх діючі значення рівні

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m \quad ; \quad E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m \quad ,$$

де Φ_m – амплітудне значення магнітного потоку.

Величина

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad , \quad (3.1)$$

називається коефіцієнтом трансформації і визначається відношенням електрорушійної сили первинної і вторинної обмоток.

При номінальному навантаженні потужного трансформатора його ККД дуже великий, приблизно 99%. Він суттєво зменшується лише при малих навантаженнях, або в малопотужних трансформаторах. Це дає можливість у першому наближенні вважати однаковими первинну та вторинну повні потужності навантаженого трансформатора [24]:

$$S_1 = U_1 I_1 \approx S_2 = U_2 I_2 \quad ,$$

тому відношення струмів навантаженого трансформатора можна вважати оберненим відношенням напруг та, відповідно, і числу витків відповідних обмоток:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k_{12}} \quad . \quad (3.2)$$

3.3. Рівняння ідеалізованого трансформатора

Трансформатор, первинна та вторинна обмотки якого не мають активних опорів та потоків розсіяння, називається ідеалізованим трансформатором.

Запишемо рівняння електричного стану ідеалізованого трансформатора використовуючи другий закон Кірхгофа [25]:

$$u_1 = -e_1 \quad ; \quad u_2 = e_2 \quad .$$

При синусоїдальній напрузі u_1 магнітний потік також змінюється за синусоїдальним законом. Магнітний потік визначає величину напруженості магнітного поля $H(t)$. З іншої сторони, за законом повного струму [26]:

$$H(t) = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2}{l_{cp}}, \quad (3.3)$$

де l_{cp} – середня лінія магнітопроводу.

При заданому законі зміни напруги на первинній обмотці u_1 сума магніторушійної сили в кожний момент часу повинна мати визначене значення незалежно від величини та характеру навантаження трансформатора. В окремому випадку – в режимі холостого ходу ($i_2 = 0$) – потік створюється тільки струмом холостого ходу i_{1xx} [26]:

$$H(t) = \frac{i_{1xx} w_1}{l_{cp}}. \quad (3.4)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (3.3) та (3.4), одержимо

$$i_{1xx} w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2.$$

Звідки

$$i_1 = i_{1xx} - i_2 \frac{w_2}{w_1} = i_{1xx} + i_2',$$

де $i_2' = -i_2 \frac{w_2}{w_1}$ – зведений вторинний струм.

Отже, величину струму в первинній обмотці можна представити у вигляді двох складових: i_{1xx} та i_2' . Перша складова i_{1xx} – намагнічуючий струм, який генерує основний магнітний потік і є сталою величиною, яка залежить від магнітних властивостей осердя. Таким чином, у трансформаторі магнітний потік не є залежним від характеру та величини навантаження і визначається рівнем прикладеної напруги. Друга складова i_2' – реакція первинної обмотки на зміну навантаження у вторинній обмотці. Ця величина змінна і залежна від величини навантаження.

У трансформаторі без магнітних втрат $i_{1xx} = 0$, тому можна вважати, що

$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1}$, відповідно, перетворення енергії відбувається без викривлення форми кривої струму.

3.4. Схеми заміщення ідеалізованого трансформатора

Наявність магнітного зв'язку обмоток утруднює аналіз режимів роботи трансформатора. У схемах заміщення магнітний зв'язок заміняють електричним. Для цього потрібно об'єднати обидві обмотки трансформатора в одну, зробивши рівними ЕРС цих обмоток $e_1 = e_2$. Рівність буде виконуватися, якщо нове число витків вторинної обмотки зробити рівним числу витків первинної обмотки.

Оскільки в трансформаторі $\frac{u_1}{u_2} = -\frac{e_1}{e_2} = -\frac{w_1}{w_2}$, то зведене значення напруги вторинної обмотки запишемо у вигляді [26]

$$u_2' = u_1 = -u_2 \frac{w_1}{w_2}$$

Зведений струм вторинної обмотки визначається з умови збереження потужності вторинної обмотки до і після перетворення $u_2 \cdot i_2 = u_2' \cdot i_2'$, відповідно

$$i_2' = i_2 \cdot \frac{u_2}{u_2'} = -i_2 \frac{w_2}{w_1}$$

Потужність втрат до і після перетворення також повинна залишитися незмінною, тобто [27]

$$R_{n2} \cdot i_2^2 = R_{n2}' \cdot i_2'^2$$

де R_{n2} – активний опір навантаження вторинної обмотки.

З цієї умови знайдемо зведене значення активного опору

$$R_{n2}' = R_{n2} \cdot \frac{i_2^2}{i_2'^2} = R_{n2} \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2$$

Аналогічно

$$L_{n2}' = L_{n2} \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 ; \quad C_{n2}' = C_{n2} \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2$$

Схема заміщення ідеалізованого трансформатора представлена на рис. 3.2.

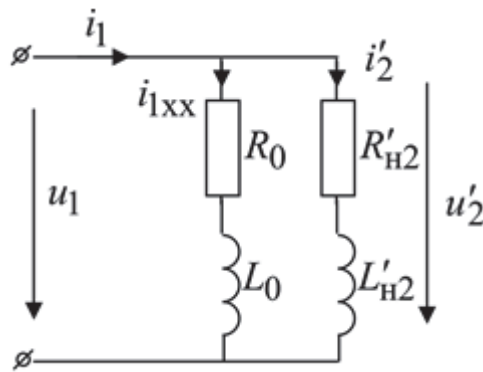


Рис. 3.2. Схема заміщення ідеалізованого трансформатора

На схемі R_0 та L_0 – параметри вітки намагнічування, яка змінює магнітний зв’язок на електричний, причому R_0 характеризує магнітні втрати в осерді, а L_0 – коефіцієнт пропорційності між основним магнітним потоком і намагнічуючим потоком; $R'_{н2}$, $L'_{н2}$ – зведені параметри навантаження [27].

3.5. Реальний трансформатор

Напруга u_1 , яка прикладається до первинної обмотки, врівноважується не тільки ЕРС e_1 робочого потоку, але й ЕРС потоків розсіяння $e_{\sigma 1}$ та спадом напруги на активному опорі первинної обмотки [28]

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + R_1 i_1$$

Враховуючи, що $e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}$, одержуємо

$$u_1 = -e_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1$$

Напруга на затискачах вторинної обмотки не рівна ЕРС e_2 від робочого потоку Φ . Вона менша на величину спаду напруги на активному та реактивному опорах обмотки

$$u_2 = e_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2$$

Рівняння магнітного стану залишається таким, як і для ідеалізованого трансформатора [27]:

$$i_{1xx} w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2$$

У комплексній формі рівняння, які описують роботу реального трансформатора мають такий вигляд [29]:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_{\sigma 1} \dot{I}_1 + R_1 \dot{I}_1 ; \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jx_{\sigma 2} \dot{I}_2 - R_2 \dot{I}_2 ; \quad \dot{I}_{1xx} w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 ,$$

де $x_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$, $x_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2}$ – індуктивні опори первинної та вторинної обмоток.

Побудова схеми заміщення здійснюється за тією ж методикою, що й для ідеалізованого трансформатора. Як і при розгляді реальної котушки, первинну та вторинну обмотки трансформатора можна представити як дві послідовно з'єднані котушки. Одна з них – «повітряна» з параметрами $R_1, L_{\sigma 1}$ і $R_2, L_{\sigma 2}$; друга – ідеалізована зі сталим осердям (рис. 3.3) [30].

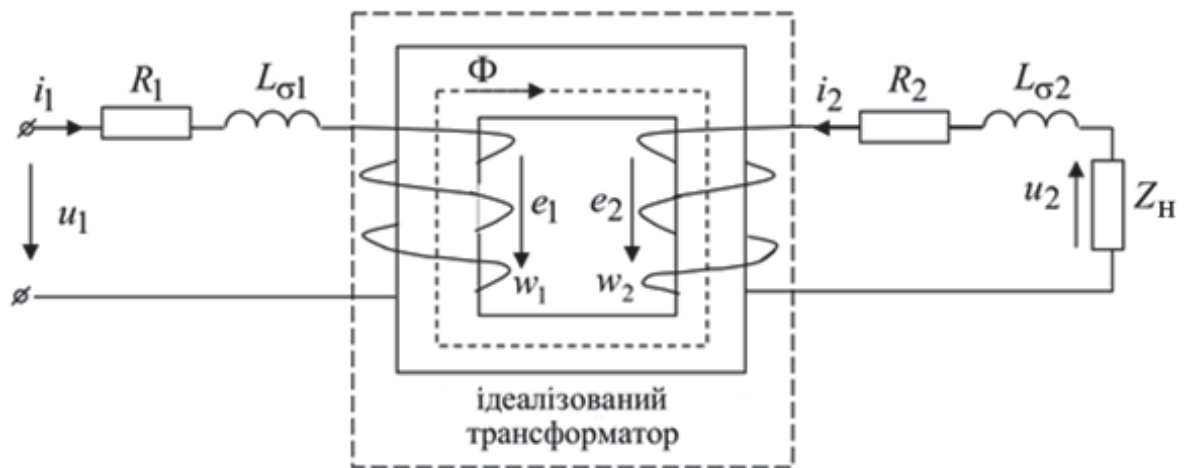


Рис. 3.3. Схема реального трансформатора

Використовуючи ті ж принципи, що й для ідеалізованого трансформатора, можна побудувати Т-подібну схему заміщення (рис. 3.4).

Т-подібна схема заміщення має суттєвий недолік: неможливо експериментально визначити всі її параметри. Тому використовують приблизну Г-подібну схему [30].

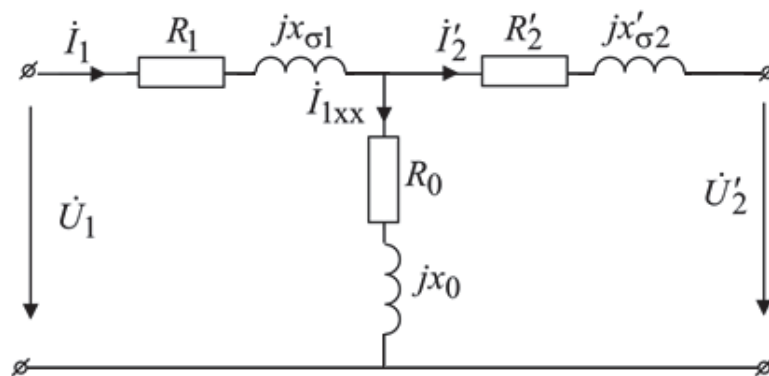


Рис. 3.4. Т-подібна схема заміщення реального трансформатора

У трансформаторах великої потужності намагнічуючий струм малий – $I_{1xx} = (0,05 \div 0,07)$ від струму первинної обмотки під навантаженням. На основі цього вітку намагнічування переносять у початок схеми (рис. 3.5), де R_0 , x_0 , $Z_0 = \sqrt{R_0^2 + x_0^2}$ – параметри холостого ходу; $R_k = R_1 + R_2'$, $x_k = x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}'$, $Z_k = \sqrt{R_k^2 + x_k^2}$ – параметри короткого замикання [31].

Побудову векторної діаграми (рис. 3.6) починають з вектору робочого потоку та намагнічуючого струму. Для побудови діаграми необхідно знати величину та характер навантаження на вторинній обмотці. Навантаження може бути активно-індуктивним ($\varphi_2 > 0$), чисто активним ($\varphi_2 = 0$) та активно-емнісним ($\varphi_2 < 0$). Побудуємо векторні діаграми для всіх випадків [31].

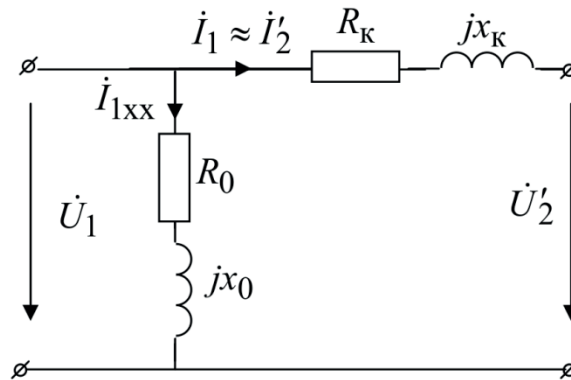


Рис. 3.5. Г-подібна схема заміщення реального трансформатора

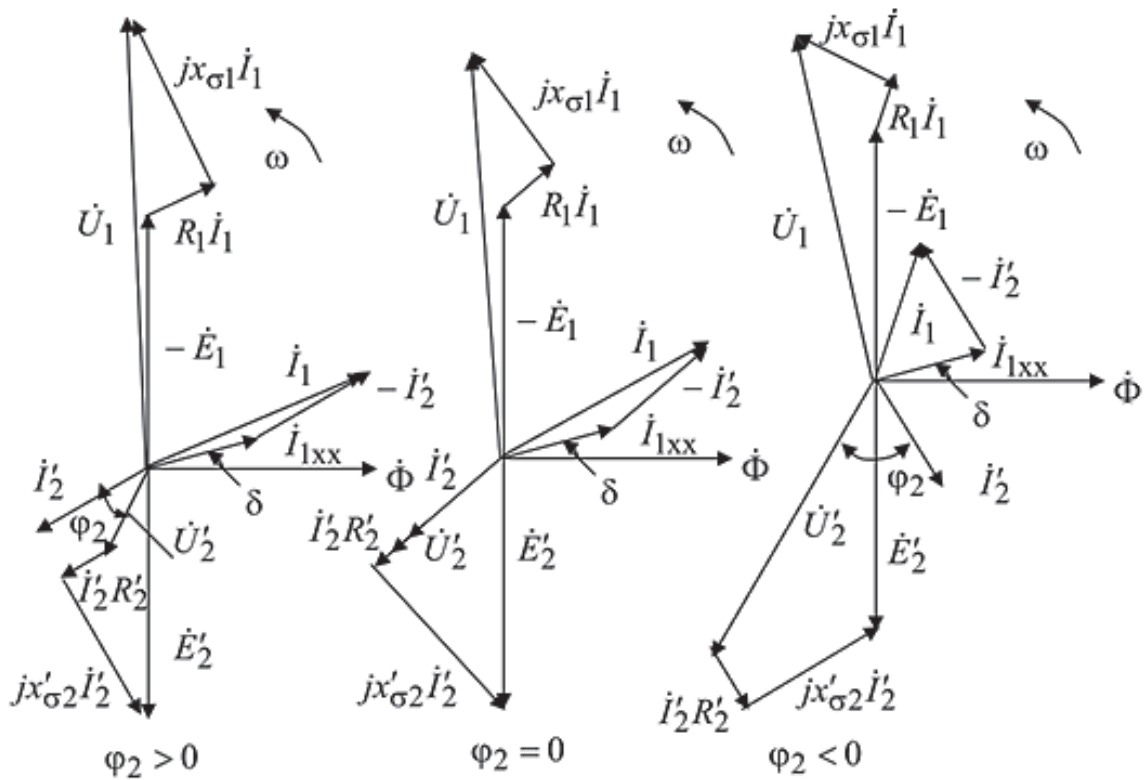


Рис. 3.6. Векторні діаграми реального трансформатора

При ємнісному навантаженні напруга на вторинній обмотці може перевищувати ЕРС на холостому ході.

3.6. Режими роботи трансформатора

Крім номінальних значень потужності, напруг, струмів, частоти в паспорті трансформатора записують ряд параметрів, які визначають дослідним шляхом і називають параметрами трансформатора в режимах холостого ходу (ХХ) та короткого замикання (КЗ). Використовуючи їх можна визначити всі експлуатаційні характеристики трансформатора: діапазон зміни напруги на приймачі при зміні струму в ньому, найбільший можливий струм при КЗ, втрати енергії в трансформаторі тощо [32-35].

Параметри трансформатора в режимі ХХ є відносне значення струму I_{1xx} у відсотках від $I_{1н}$ та потужність втрат у магнітопроводі P_{xx} , виміряні при $U_{1н}$; параметрами в режимі КЗ – напруга u_k у відсотках від $U_{1н}$ та потужність втрат в обмотках P_k при $I_{1н}$, $I_{2н}$.

3.6.1. Режим холостого ходу трансформатора

Всі трансформатори досліджують у режимі холостого ходу (рис. 3.7).

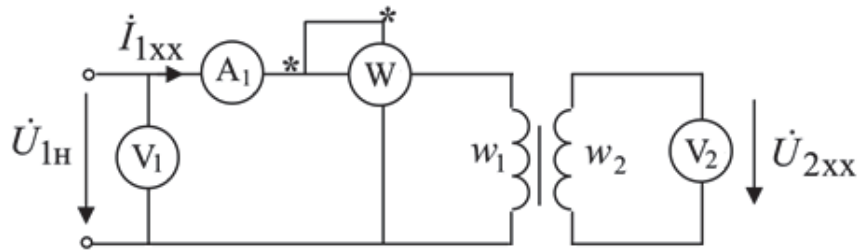


Рис. 3.7. Схема режиму холостого ходу трансформатора

При такому режимі первинна обмотка включається на напруги мережі U_{1H} , а вторинна обмотка розмикається. Вимірювальні прилади реєструють, що в первинній обмотці є невеликий струм холостого ходу $I_{1XX} = (3 \div 10)$ від I_{1H} , і трансформатор споживає від мережі електроенергію, потужність якої (відносно невелика) називають втратами ХХ P_{XX} . Ця потужність вимірюється ватметром і визначається основною втратами в магнітопроводі P_{CT} трансформатора. Потужність втрат у магнітопроводі пропорційна Φ^2 , а оскільки діюче значення ЕРС E_{1XX} пропорційне Φ , то P_{XX} пропорційна U_{1H}^2 . Втрати в обмотках трансформатора (електричні P_{el}) в досліді ХХ незначні через мале значення струму I_{1XX} . З досліді ХХ можна знайти повний опір трансформатора та коефіцієнт потужності [32]

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{1XX}} ; \quad \cos \phi_{XX} = \frac{P_{XX}}{U_{1H} I_{1XX}} ,$$

де ϕ_{XX} – зсув фаз між U_{1H} та I_{1XX} . Також, з цього досліді визначають активний та індуктивний опір схеми заміщення трансформатора (рис. 3.5) в режимі ХХ [32]:

$$R_0 = \frac{P_{XX}}{I_{1XX}^2} , \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} .$$

Вимірявши вольтметром первинну U_{1H} та вторинну U_{2XX} напруги коефіцієнт трансформації можна визначити з великою точністю [32]

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{1H}}{U_{2XX}} .$$

Цей коефіцієнт вказують на щитках трансформаторів у вигляді відношення номінальних напруг трансформатора в режимі ХХ, наприклад «6000/230» (як відношення вищої напруги до нижчої).

3.6.2. Режиму короткого замикання трансформатора

Треба розрізнати режим короткого замикання в експлуатаційних умовах і дослід короткого замикання. Перший – це аварійний режим трансформатора, коли КЗ відбувається при номінальній первинній напрузі. При цьому струми в обмотках можуть в десятки разів перевищити свої номінальні значення, що приведе до механічного та теплового руйнування активних частин трансформатора.

У досліді КЗ вторинну обмотку замикають на коротко (рис. 3.8), а до первинної обмотки підводиться така понижена напруга $U_{1к}$, при якій струми в обмотках дорівнюють номінальним $I_{1н}$ та $I_{2н}$ [33].

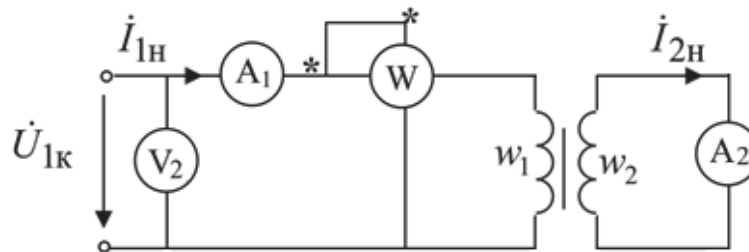


Рис. 3.8. Схема досліді короткого замикання трансформатора

Відносне значення цієї напруги, яке називають напругою КЗ, становить

$$u_k = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100 = (5 \div 10) \% U_{1н}$$

Ця напруга є одним з паспортних параметрів трансформатора та використовується для визначення ряду експлуатаційних характеристик. У досліді КЗ активна потужність P_k , виміряна ватметром є потужністю електричних втрат $P_{ел}$ в обмотках. У цьому досліді втрати в магнітопроводі $P_{ст}$ незначні і становлять $(0,05 \div 0,1)$ від втрат при номінальному режимі через понижено напругу $U_{1к}$ і, відповідно, нехтуючи малого основного магнітного потоку Φ . Потужність втрат при КЗ і номінальних струмах [33]

$$P_k = R_1 I_{1н}^2 + R_2 I_{2н}^2$$

За даними досліді КЗ можна визначити параметри спрощеної схеми

заміщення (рис. 3.5). Для цього визначають повний опір $Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1н}}$, коефіцієнт

потужності $\cos \phi = \frac{P_{\kappa}}{U_{1\kappa} I_{1н}}$. Тоді розраховують $R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{I_{1н}^2}$ і $x_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}$.
 При цьому параметри схеми заміщення (рис. 3.4) визначають так:

$$x_{\sigma 1} \approx x'_{\sigma 2} = \frac{1}{2} x_{\kappa} \quad ; \quad R_1 \approx R'_2 = \frac{1}{2} R_{\kappa} \quad [33].$$

3.7. Зміна напруги на вторинній обмотці трансформатора

З розглянутої спрощеної схеми заміщення трансформатора (рис. 3.5) видно, що вторинна напруга змінюється зі зміною струму приймача внаслідок спаду напруги в обмотках. Зміну вторинної напруги $\Delta U_2 = U_{2xx} - U_2$ визначають зазвичай у відсотках

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2xx} - U_2}{U_{2xx}} \cdot 100$$

Потрібно ввести поняття коефіцієнта навантаження трансформатора

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1н}} \approx \frac{I_2}{I_{2н}}$$

Для трансформатора дуже важливою є його зовнішня характеристика, тобто залежність вторинної напруги U_2 від струму навантаження I_2 при фіксованій напрузі $U_1 = U_{1н}$ та сталому коефіцієнті потужності приймача $\phi_2 = \text{const}$. При зміні $0 < \beta < 1$ напруга на виході трансформатора змінюється несуттєво, що забезпечує стабільність напруги на навантаженні. Також, з рис. 3.9 видно, що зміна напруги залежить від характеру навантаження [34].

Регулювання напруги здійснюється зміною коефіцієнта трансформації. Для цього на первинній обмотці є виводи, які дозволяють змінювати число витків в межах $\pm 5\%$. Число витків регулюється спеціальним перемикачем [35].

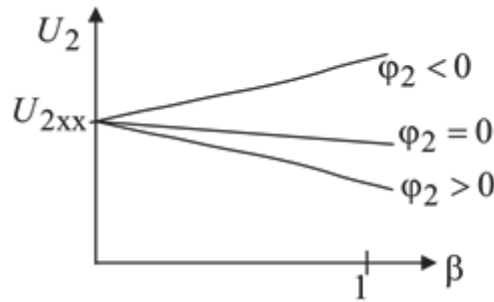


Рис. 3.9. Залежність вторинної напруги від коефіцієнта навантаження трансформатора

3.8. Втрати енергії та ККД трансформатора

Перетворення напруг і струмів трансформатором супроводжується втратами енергії: магнітними (втратами в сталі магнітопроводу на гістерезис та вихрові струми) $P_{ст}$ і електричними $P_{ел}$ (втрата на нагрів в обмотках) [36].

Магнітні втрати визначаються величиною та частотою магнітного потоку та не залежать від величини і характеру навантаження: $P_{ст} = \text{const} \approx P_{xx}$.

Електричні втрати в обмотках $P_{ел}$ пропорційні квадрату струму, і їх можна виразити через потужність втрат КЗ $P_{к} = R_{к} I_{1н}^2$:

$$P_{ел} = R_{к} I_1^2 = R_{к} \frac{I_{1н}^2}{I_{1н}^2} I_1^2 = \beta^2 P_{к}$$

Хоч робота трансформатора полягає в передачі повної потужності, його ККД визначають за величиною активної потужності, яка передається та втратами енергії [36]:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_2 + P_{ел} + P_{ст}} = \frac{U_2 I_2 \cos \phi_2}{U_2 I_2 \cos \phi_2 + P_{ел} + P_{ст}} = \\ &= \frac{U_2 \left(\frac{I_2}{I_{н2}} \right) I_{н2} \cos \phi_2}{U_2 \left(\frac{I_2}{I_{н2}} \right) I_{н2} \cos \phi_2 + \beta^2 P_{к} + P_{ст}} = \frac{\beta S_{н} \cos \phi_2}{\beta S_{н} \cos \phi_2 + \beta^2 P_{к} + P_{ст}} \end{aligned}$$

де $S_{н} = U_2 I_{2н}$ – номінальна повна потужність. Знайдемо екстремум даної функції від аргументу – коефіцієнта навантаження β . Для цього прирівняємо до

нуля похідну $\frac{d\eta}{d\beta}$:

$$\frac{d\eta}{d\beta} = \frac{S_H \cos \phi_2 (\beta S_H \cos \phi_2 + \beta^2 P_K + P_{xx}) - \beta S_H \cos \phi_2 (S_H \cos \phi_2 + 2 \beta P_K)}{(\beta S_H \cos \phi_2 + \beta^2 P_K + P_{xx})^2} = 0$$

Цей вираз дорівнює нулю, якщо чисельник дорівнює нулю:

$$\beta S_H^2 \cos^2 \phi_2 + S_H \cos \phi_2 \beta^2 P_K + S_H \cos \phi_2 P_{xx} - \beta S_H^2 \cos^2 \phi_2 - 2 \beta^2 P_K S_H \cos \phi_2 = 0$$

$$S_H \cos \phi_2 P_{xx} - \beta^2 P_K S_H \cos \phi_2 = 0 \quad ; \quad S_H \cos \phi_2 (P_{xx} - \beta^2 P_K) = 0$$

В кінцевому випадку $P_{xx} = \beta^2 P_K$, звідки $\beta = \sqrt{\frac{P_{xx}}{P_K}}$. Це означає, що максимальний ККД буде при рівності змінних електричних втрат сталим магнітним втратам. При навантаженнях більших від номінальних непропорційно зростають змінні втрати, що призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії [36].

Залежність магнітних і електричних втрат від коефіцієнта навантаження та залежність $\eta(\beta)$ приведено на рис. 3.10. Зазвичай для трансформатора

$\frac{P_{xx}}{P_K} = 0,25 \div 0,5$ і $\beta = 0,5 \div 0,7$. Відповідно, найбільше значення ККД трансформатора буде при струмі навантаження 50-70% від номінального. Максимальний ККД силових трансформаторів досягає 99,5%. Для виключення похибок (клас точності приладів) ККД визначають непрямим методом за дослідями ХХ та КЗ [36].

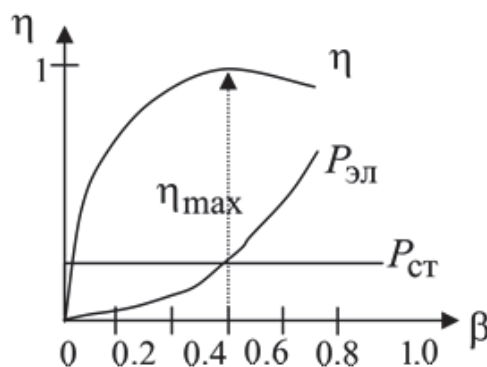


Рис. 3.10. Залежність магнітних і електричних втрат від коефіцієнта навантаження та залежність $\eta(\beta)$

3.9. Трифазні трансформатори

Трансформування енергії у трифазному колі можна здійснювати або трифазними груповими трансформаторами, або стрижневими. Первинні та

вторинні обмотки трансформаторів можуть з'єднуватися або зіркою, або трикутником [37, 38].

Основну частину трансформаторів малої та середньої потужності конструюють трифазними, а у випадку великих потужностей питання вирішується з врахуванням усіх конкретних умов.

В групових трансформаторах трифазний трансформатор формується із трьох однофазних. Первинні та вторинні обмотки вкладаються на окреме осердя. На рис. 3.11 представлено груповий трансформатор, який з'єднаний за схемою Y/Y [37].

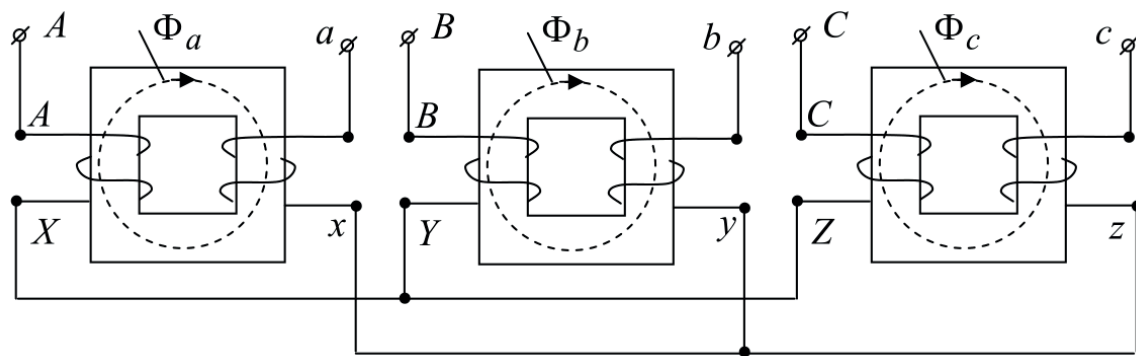


Рис. 3.11. Груповий трансформатор

Групові трансформатори мають великі габарити та вагу. Їх перевага – при ідентичності магнітопроводів магнітні потоки утворюють симетричну систему.

Для покращення масо-габаритних показників використовують стрижневі трансформатори. Кожна фаза такого трансформатора розташовується на своєму стрижні (рис. 3.12). Недоліком є несиметричність магнітної системи. Для усунення цього недоліку середній стрижень виготовляють іншого перетину в порівнянні з крайніми. При виконанні цієї умови вдається одержати симетричну систему магнітних потоків. Оскільки система виявляється симетричною і в електричному і в магнітному сенсі (рис. 3.13), всі розрахунки можна вести на одну фазу, тобто теорія однофазного трансформатора повністю відповідає трифазному [37].

Трансформатори, в залежності від зсуву фаз між лінійними первинною та вторинною напругою, поділяються на групи з'єднань, причому групу з'єднань формують трансформатори з однаковим зсувом фаз між вказаними напругами [38].

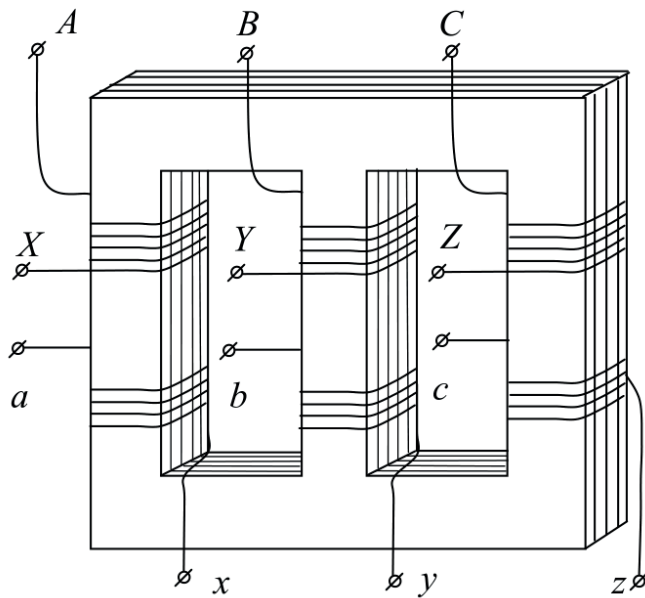


Рис. 3.12. Стрижневі трансформатори

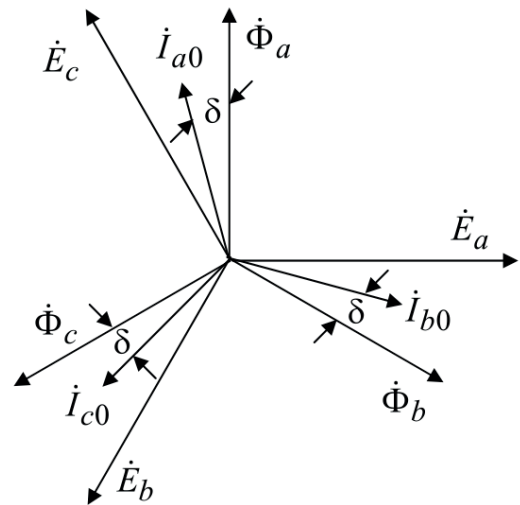


Рис. 3.13.

Для позначення групи з'єднань вибирається ряд цілих чисел від 1 до 12. Умовно приймається, що одиниця відповідає 30° , за аналогією з кутом між хвилинною та годинною стрілками годинника при 1, 2, ... 12 год. Відповідно 2 – 60° , 3 – 90° і т.д. При визначенні групи з'єднань з вектором напруги обмотки вищої напруги потрібно сумістити хвилинну стрілку, а з вектором напруги обмотки нижчої напруги – годинну стрілку. Відлік кута виконується від хвилинної стрілки до годинної за напрямком їх обертання. Приклади визначення групи з'єднань для однофазного трансформатора приведено на рис. 1.14 а, б; для трифазного – рис. 1.15, а, б [38].

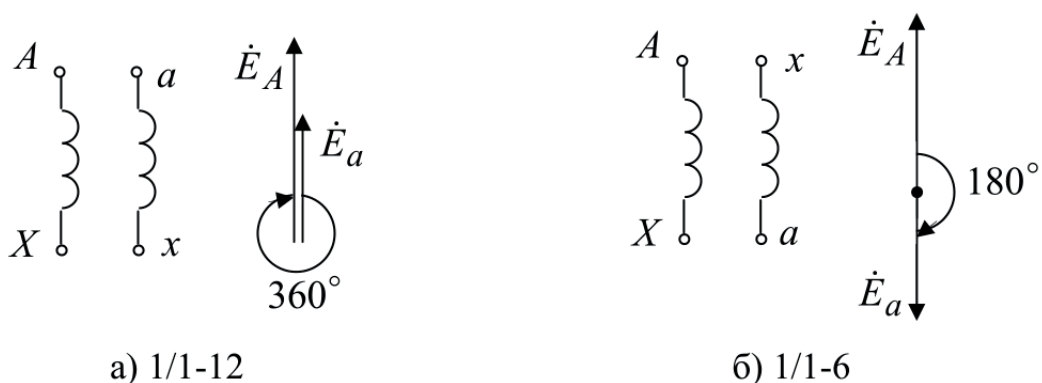


Рис. 3.14. Приклади визначення групи з'єднань для однофазного трансформатора

При з'єднанні Y/Y можна одержати всі парні групи з'єднань: 2, 4, 6, 8, 10, 12. При з'єднанні Y/ Δ (або Δ /Y) можна одержати всі непарні групи: 1, 3, 5, 7, 9, 11 [38].

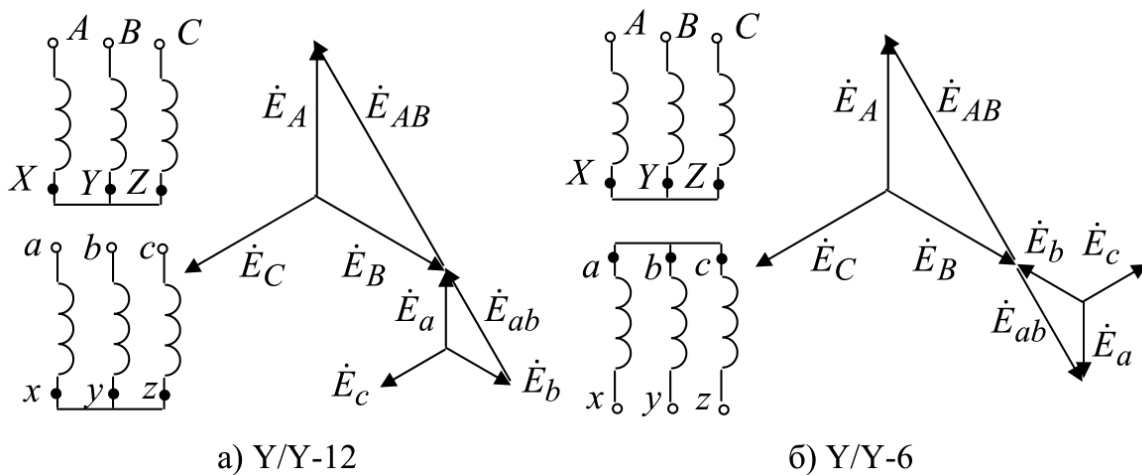


Рис. 3.15. Приклади визначення групи з'єднань для трифазного трансформатора

3.10. Автотрансформатори

Автотрансформатор – це вид трансформатора, в якому між первинною і вторинною обмотками крім магнітного існує також електричний зв'язок. Звичайний трансформатор можна включити за схемою автотрансформатора, якщо до кінця первинної обмотки під'єднати початок вторинної або якщо навантаження під'єднати до наявних відводів первинної обмотки [39].

Однак при цьому не будуть у повній мірі використані ті переваги, які має автотрансформатор. Електромагнітна схема понижувального та підвищувального автотрансформаторів приведена на рис. 3.16, а, б [40].

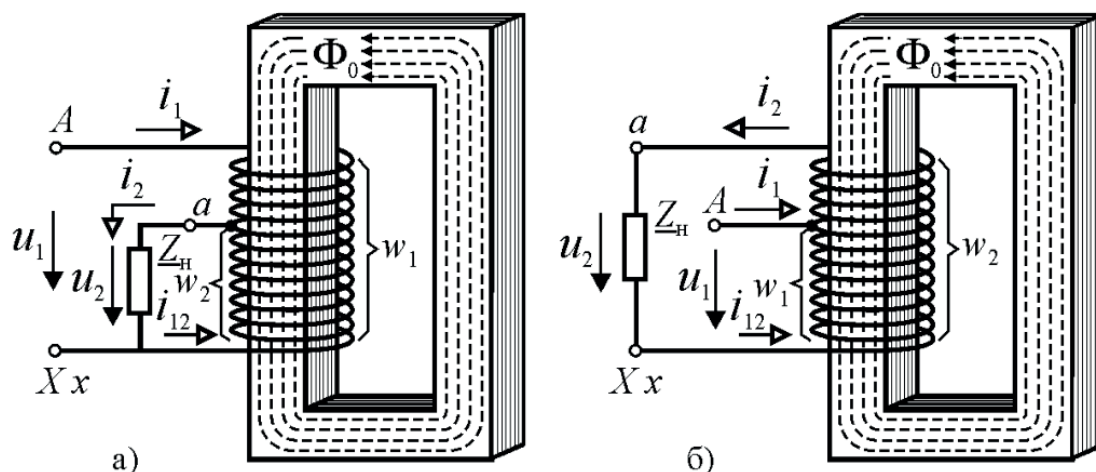


Рис. 3.16. Схема автотрансформатора: а) підвищувального; б) понижувального

Розглянемо роботу понижувального автотрансформатора рис. 3.16, а. Обмотка ax є вторинною та одночасно частиною первинної обмотки Ax . Нехтуючи струмом намагнічування, для точки a можна записати

$$I_{12} = I_2 - I_1. \quad (1.5)$$

тобто у витках вторинної обмотки протікає струм, рівний різниці струмів первинної обмотки і навантаження. Струми та ЕРС обмоток автотрансформатора пов'язані такими ж співвідношеннями, як у трансформаторі [40]

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

Тому при невеликих значеннях k струм в обмотці ax $I_{12} = I_1(k-1)$ суттєво менший, ніж струм I_1 , що протікає в частині обмотки Aa , і її можна виконати проводом меншого перерізу, знизивши тим самим вартість і масу виробу.

Повна потужність автотрансформатора $S_{np} = U_2 I_2$ називається прохідною потужністю. Враховуючи вираз (1.5) її можна розділити на дві складові [40]

$$S_{np} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_{el} + S_p. \quad (1.6)$$

Тут $S_{el} = U_2 I_1$ – потужність, яка електричним шляхом передається у навантаження за рахунок гальванічного зв'язку між обмотками; $S_p = U_2 I_{12}$ – розрахункова потужність, яка називається так тому, що вона визначає розрахункові параметри магнітопроводу. Розрахункова потужність є потужністю, яка передається в навантаження за допомогою магнітного поля. У звичайному трансформаторі прохідна потужність є розрахунковою. В автотрансформаторі розрахункова потужність становить лише частину прохідної, тому переріз магнітопроводу можна зменшити, знизивши за рахунок цього масу, габарити і вартість.

Зменшення об'єму магнітопроводу та струму у вторинній обмотці знижує втрати в «сталі» та в «міді» автотрансформатора в порівнянні з трансформатором тієї ж потужності, тому ККД автотрансформатора більший і досягає 99,7%. Однак зі збільшенням коефіцієнта трансформації ці переваги втрачаються. Тому автотрансформатори використовують для перетворення напруги з $k \leq 2$.

Головною причиною недоліків автотрансформаторів, як і його переваг, є наявність електричного зв'язку між обмотками. Вона істотно посилює вимоги до ізоляції обмотки і до підготовки обслуговуючого персоналу, тому що на стороні нижчої напруги між проводами та землею існує така ж напруга як на

стороні вищої напруги. Крім того, при короткому замиканні понижуючого автотрансформатора струм суттєво вищий, тому що він обмежується тільки витками частини первинної обмотки $w_1 - w_2$, що вимагає прийняття особливих заходів захисту [39].

Автотрансформатори застосовуються в лініях передачі та розподілу енергії для зв'язку мереж з близькими значеннями напруг. Вони застосовуються також для зниження струму при запуску потужних двигунів. Широке поширення мають автотрансформатори з плавним регулюванням коефіцієнта трансформації, які називають лабораторними автотрансформаторами (ЛАТР). Регулювання напруги в них здійснюється за рахунок підключення навантаження за допомогою ковзкого контакту, при переміщенні якого число витків w_2 змінюється в межах $0 \leq w_2 \leq w_1$ [39].

3.11. Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори напруги та струму застосовуються: 1) для розмежування кіл вимірювальних приладів і захисної апаратури від кіл з високою напругою з метою забезпечення безпеки обслуговування і зниження вимог до ізоляції приладів; 2) для перетворення напруги та струму до величин, допустимих для вимірювання стандартними приладами [36].

Трансформатори напруги включаються в коло за схемою рис. 3.17, а. Оскільки опір вольтметра дуже великий, то вони працюють у режимі близькому до холостого ходу. Похибка, що вноситься у вимір трансформатором, визначається величиною повних опорів його обмоток. Чим менші ці опори, тим менша похибка, тому при проектуванні вимірювальних трансформаторів прагнуть зменшити ці величини. Вимірювальні трансформатори напруги є приладами з нормованою похибкою і виготовляються з класами точності 0,2; 0,5; 1,0 та 3,0. Вторинна напруга більшості трансформаторів – 100 В [36].

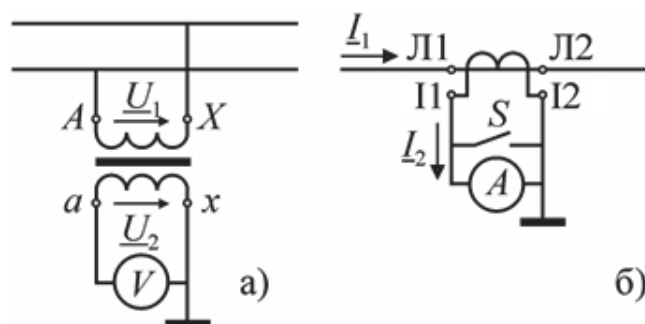


Рис. 3.17. Схема включення вимірювального трансформатора:

а) трансформатора напруги; б) трансформатора струму
 Вимірюється напруга U_1 визначається за показами вольтметра U_2 :

$$U_1 = \frac{w_1}{w_2} U_2 = k_U U_2$$

де $k_U = \frac{w_1}{w_2}$ – коефіцієнт трансформації.

Крім похибки вимірювання модуля напруги вимірювальні трансформатори створюють фазовий зсув між напругою \bar{U}_1 і \bar{U}_2 – δ_U . Він вимірюється в кутових хвилинах і вважається позитивним, якщо вторинна напруга випереджає по фазі первинну. Кутова похибка трансформатора впливає на вимірювання потужності. До вторинної обмотки вимірювального трансформатора паралельно вольтметру можуть підключатися обмотка напруги ватметра, обмотки захисних реле, входи різних приладів тощо.

Трансформатори струму включаються у розрив кола або лінії аналогічно включенню амперметра (Л1-Л2 на рис. 3.17, б). У коло вторинної обмотки (П1-П2) можуть послідовно підключатися амперметр, струмова обмотка ватметра, датчики струму, реле струмового захисту тощо. Однак збільшення навантаження вторинного кола призводить до збільшення похибки перетворення струму.

Вхідний опір амперметра є дуже малим, тому трансформатор струму працює в режимі наближеному до режиму короткого замикання. Для зменшення похибки трансформаторів струму намагаються їх проектувати таким чином, щоб струм намагнічування був мінімально можливим. Тоді вимірюваний струм I_1 можна визначити за виразом [39]

$$I_1 = \frac{w_2}{w_1} I_2 = k_I I_2$$

де $k_I = \frac{w_2}{w_1}$ – коефіцієнт трансформації, I_2 – значення струму за показами амперметра.

Трансформатори струму виготовляються з класами точності 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 та 10,0. Для перших трьох класів встановлюється також допустима кутова похибка δ_I : 10', 40' і 80'. Для інших класів кутова похибка не нормується [36].

При розмиканні вторинної обмотки розмагнічуюча дія її струму зникає, і

магнітний потік зростає в десятки та сотні разів. На контактах вторинної обмотки виникає напруга, яка становить небезпеку для життя людини, а сам трансформатор струму може вийти з ладу внаслідок руйнування ізоляції або перегріву від збільшення втрат у магнітопроводі. Тому в коло вторинної обмотки обов'язково вводиться шунтуючий ключ S , який повинен замикатися до того, як відмикається амперметр.

3.12. Імпульсний трансформатор

Часто у блоки живлення побутової, комп'ютерної та спеціальної техніки вмонтовують імпульсні трансформатори.

Імпульсним називають трансформатор, який має феромагнітне осердя і призначений для перетворення імпульсів електричного струму або напруги з тривалістю до десятків мікросекунд з мінімальним викривленням форми імпульсу. Імпульсні трансформатори використовують в імпульсному радіозв'язку, радіолокації, автоматиці та обчислювальній техніці для зміни полярності імпульсів, узгодження джерела імпульсів з навантаженням, додавання сигналів, розділення електричних кіл за постійним та змінним струмом, засвічування імпульсних ламп тощо [41].

На первинний контур імпульсного трансформатора подаються однополярні імпульси. Серцевина залишається у стані постійного намагнічування. На первинній обмотці визначаються імпульсні сигнали прямокутної форми (рис. 3.18). Інтервал між ними в часі короткий. При цьому з'являються перепади індуктивності. Вони відображаються імпульсами на вторинній котушці. Ця особливість є основою принципу роботи таких пристроїв.

Виділяють різні типи імпульсної схеми силового обладнання. Агрегати відрізняються в першу чергу формою конструкції. Від цього залежать експлуатаційні характеристики. За видом обмотки розрізняють агрегати (рис. 3.19): тороїдальний, броневий, стрижневий, бронестрижневий [41].

Перерізи серцевини бувають прямокутні та круглі. Також розрізняють типи обмоток: спіральні, циліндричні та конічні. У першому випадку індуктивність розсіювання буде мінімальною. Цей тип застосовують для автотрансформаторів. Циліндричний тип обмотки характеризується низьким показником розсіювання індукції. Це проста технологічна конструкція. Конічні різновиди значно зменшують розсіювання індуктивності. Ємність обмоток при цьому збільшується мало. Ізоляція між двома шарами обмоток пропорційна напрузі

між первинними витками. Товщина контурів збільшується від початку до кінця [41].

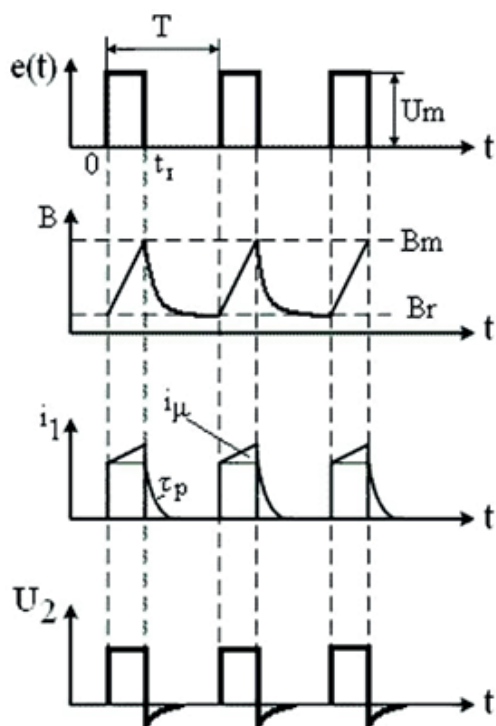
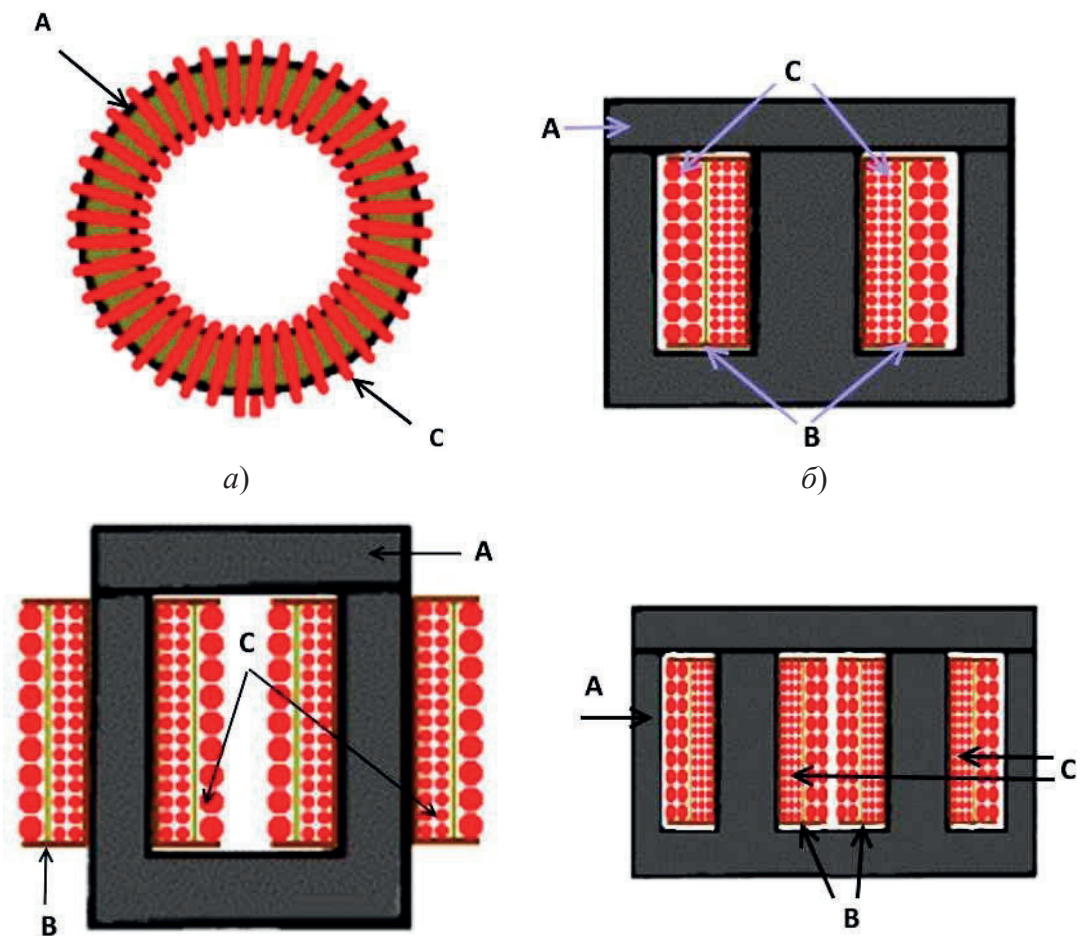


Рис. 3.18. Імпульсні сигнали прямокутної форми на первинній обмотці імпульсного трансформатора



в)

г)

Рис. 3.19. Імпульсні трансформатори за видом обмотки: а) тороїдальний; б) броневий; в) стрижневий; г) бронестрижневий

Трансформатори імпульсного типу вирізняються такими перевагами: мала вага, низька ціна, підвищений ККД, розширений діапазон напруг, можливість вбудувати захист.

3.13. Сучасні високовольтні оптико-електронні трансформатори струму та напруги

Всі високовольтні оптико-електронні трансформатори складаються з трьох складових частин: первинного перетворювача, розташованого в зоні високого потенціалу; вторинного перетворювача, розташованого в зоні низького потенціалу; оптичної лінії, що забезпечує надійний зв'язок первинного та вторинного перетворювачів. Первинний перетворювач формує оптичний сигнал, параметри якого несуть інформацію про миттєве значення вимірюваної величини. Вторинний перетворювач формує з цього сигналу вихідну напругу в формі зручній для споживача. Оптична лінія передає сигнал від первинного перетворювача до вторинного та забезпечує надійну високовольтну ізоляцію між цими перетворювачами.

Сучасні оптико-електронні трансформатори струму та напруги за принципом дії поділяються на пристрої з внутрішньою і зовнішньою модуляцією світлового потоку [42].

У стрижневих оптико-електронних трансформаторах (рис. 3.20) світловий потік джерела світла по першому багатомодовому світловоді надходить на поляризатор, розташований на вході первинного перетворювача, стає лінійно поляризованим і поширюється уздовж стрижнів цього перетворювача [43].

В оптико-електронному трансформаторі струму чотири стрижні, виконані з діамагнітного магнітооптичного скла, утворюють замкнутий контур навколо шини з вимірюваним струмом. В оптико-електронному трансформаторі напруги стрижнем є електрооптичний кристал, розташований між високовольтними електродами. Після перетворювача площина поляризації світла повертається на кут пропорційний вимірюваній величині. Площина пропускання аналізатора розташована під кутом 45 градусів до площини пропускання поляризатора, тому він виділяє світловий потік, що залежить як від інтенсивності падаючого на аналізатор світлового потоку, так і від кута повороту площини поляризації в

первинному перетворювачі. Цей світловий потік по другому багатомодовому світловоді надходить до фотоприймача електронного блоку, який перетворює його в напругу пропорційну до його інтенсивності.

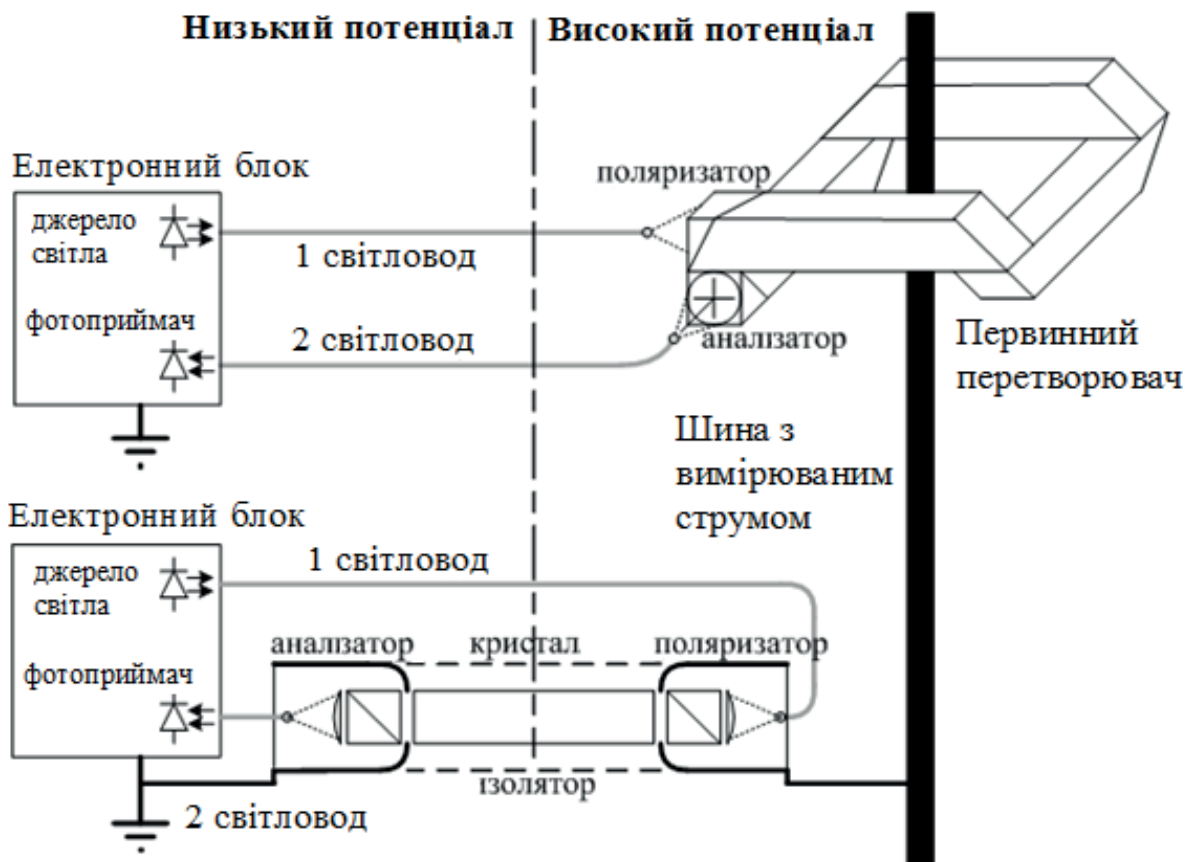


Рис. 3.20. Стрижневі оптико-електронні трансформатори струму та напруги

У волоконних оптико-електронних трансформаторах (рис. 3.21) світловий потік джерела світла через спрямований відгалужувач надходить на волоконний поляризатор, стає лінійно поляризованим і вводиться в одномодове волокно. Площина поляризації світла встановлюється під кутом 45 градусів до осей подвійного променезаломлення, тому у волокні збуджуються дві лінійно поляризовані хвилі рівної інтенсивності, але з ортогональними поляризаціями. Після фазового модулятора, поляризовані хвилі набувають фазову модуляцію і надходять у лінію затримки, яка має швидку та повільну осі поширення світла, що забезпечують різну затримку хвиль з ортогональними поляризаціями. Різниця затримок вибирається більша ніж час когерентності джерела світла, тому на виході волокна одночасно формуються дві некогерентні лінійно поляризовані хвилі [44].

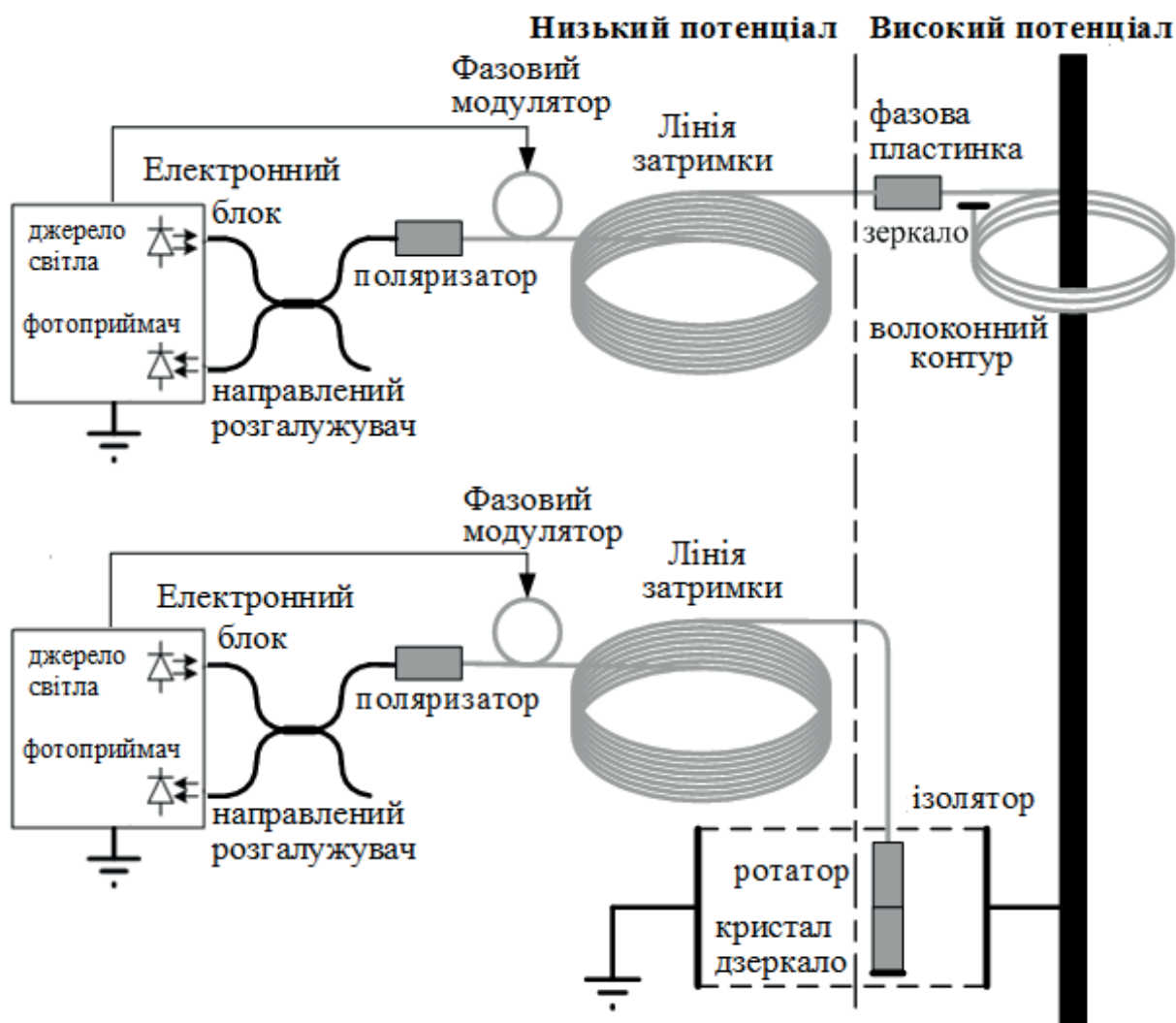


Рис. 1.21. Волоконні оптико-електронні трансформатори струму та напруги

Волоконні оптико-електронні трансформатори струму і напруги можуть успішно використовуватися для перетворення постійних, змінних та імпульсних величин. Застосування фазового методу вимірювання забезпечує високу точність перетворення, але для її реалізації необхідно враховувати гармонійний склад вимірюваних величин і правильно вибирати частоту модуляції.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ СОМОКОНТРОЛЮ

4.1. Приклади розв'язування задач

Приклад 4.1. До джерела з напругою $U = 120$ В і частотою $f = 50$ Гц підключена котушка RL з активним опором $R = 12$ Ом та індуктивністю $L = 0,051$ Гн (рис. 4.1, а).

Визначити силу струму струм, активну та реактивну складові напруги, коефіцієнт потужності, активну, реактивну і повну потужності котушки. Побудувати векторну діаграму.

Розв'язування.

Дано:	Індуктивний опір котушки:
$U = 120$ В	$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,051 = 16$ Ом.
$R = 12$ Ом	Повний опір котушки:
$f = 50$ Гц	$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} = \sqrt{400} = 20$ Ом.
$L = 0,051$ Гн	Сила струму в котушці:
$I - ?$ $U_a - ?$	$I_K = \frac{U}{Z} = \frac{120}{20} = 6$ А.
$U_L - ?$ $\cos \phi - ?$	Коефіцієнт потужності:
$P - ?$ $Q - ?$	
$S - ?$	

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{12}{20} = 0,6$$

Активна складова напруги:

$$U_a = R \cdot I = 12 \cdot 6 = 72 \text{ В.}$$

Реактивна складова напруги:

$$U_L = X_L \cdot I = 16 \cdot 6 = 96 \text{ В.}$$

Активна потужність:

$$P = R \cdot I^2 = 12 \cdot 6^2 = 432 \text{ Вт.}$$

Реактивна потужність:

$$Q = X_L \cdot I^2 = 16 \cdot 6^2 = 576 \text{ вар.}$$

Повна потужність:

$$S = Z \cdot I^2 = 20 \cdot 6^2 = 720 \text{ ВА.}$$

Побудуємо векторні діаграми напруг і струму (рис. 4.1, б)

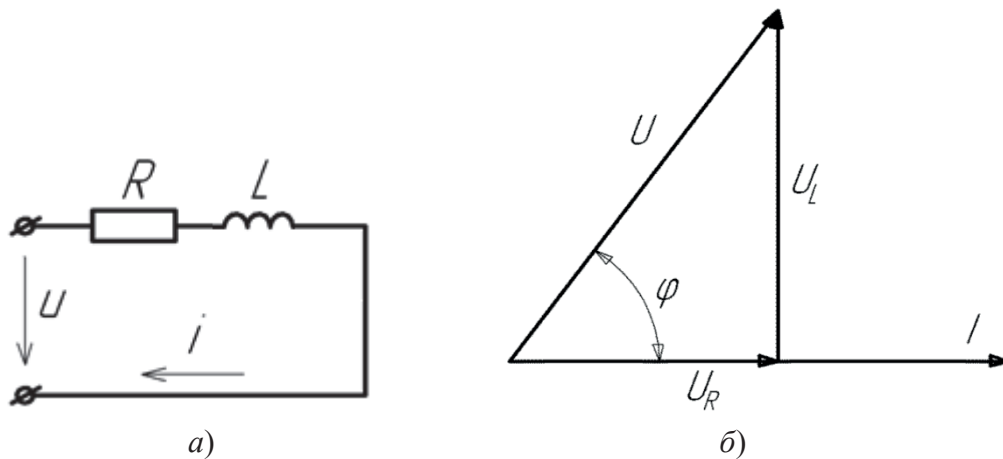


Рис. 4.1. Електрична схема (а) та векторні діаграми напруг і струму (б)

Приклад 4.2. До джерела змінного струму з $U = 200$ В, $f = 50$ Гц підключені послідовно реостат R з опором 30 Ом, котушка L з індуктивністю $0,3185$ Гн і конденсатор з ємністю $53,1$ мкФ (рис. 4.2, а).

Визначити силу струму в колі, спад напруги на активному опорі, індуктивності, ємності, коефіцієнт потужності кола, активну, реактивну та повну потужності. Побудувати векторну діаграму.

Розв'язання.

Дано:

$$U = 200 \text{ В}$$

$$f = 50 \text{ Гц}$$

$$R = 30 \text{ Ом}$$

$$L = 0,3185 \text{ Гн}$$

$$C = 53,1 \text{ мкФ}$$

$$I - ? \quad U_a - ?$$

$$U_L - ? \quad U_C - ?$$

$$\cos \phi - ? \quad P - ?$$

$$Q - ? \quad S - ?$$

Індуктивний опір:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,3185 = 100 \text{ Ом.}$$

Ємнісний опір:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 53,1 \cdot 10^{-6}} = 60 \text{ Ом.}$$

Повний опір:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{30^2 + (100 - 60)^2} = \sqrt{2500} = 50 \text{ Ом.}$$

Сила струму в колі:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{200}{50} = 4 \text{ А.}$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{30}{50} = 0,6$$

Спад напруги на активному опорі:

$$U_a = R \cdot I = 30 \cdot 4 = 120 \text{ В.}$$

Спад напруги на котушці індуктивності:

$$U_L = X_L \cdot I = 100 \cdot 4 = 400 \text{ В.}$$

Спад напруги на конденсаторі:

$$U_C = X_C \cdot I = 60 \cdot 4 = 240 \text{ Ом.}$$

Активна потужність:

$$P = R \cdot I^2 = 30 \cdot 4^2 = 480 \text{ Вт.}$$

Реактивна потужність:

$$Q = (X_L - X_C) \cdot I^2 = 40 \cdot 4^2 = 640 \text{ вар.}$$

Повна потужність:

$$S = Z \cdot I^2 = 50 \cdot 4^2 = 800 \text{ ВА.}$$

Будуємо векторні діаграми напруг і струму (рис. 4.2, б)

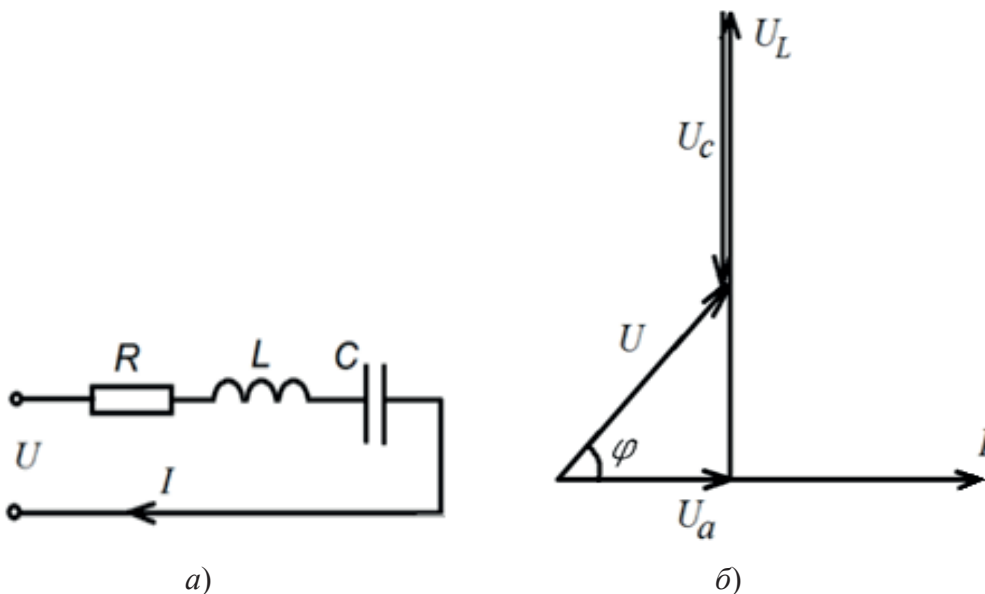


Рис. 4.2. Електрична схема (а) та векторні діаграми напруг і струму (б)

Приклад 4.3. До джерела синусоїдальної напруги частотою $f = 50$ Гц підключена котушка індуктивності (рис. 4.3, а). Активний опір проводу, з якого виготовлена котушка, $R = 10$ Ом, індуктивність $L = 1,6$ мГн. Осцилограма напруги $u_{ш}(t)$ представлена на рис. 4.3, б. Опір шунта $R_{ш} = 0,1$ Ом. Масштаб по вертикальній осі осцилограми $m_u = 0,02$ В/под. (0,02 вольти на поділку).

Розрахувати значення напруги u_{RL} , складових u_R і u_L цієї напруги. Побудувати графіки миттєвих значень напруг u_{RL} , складових u_R і u_L .

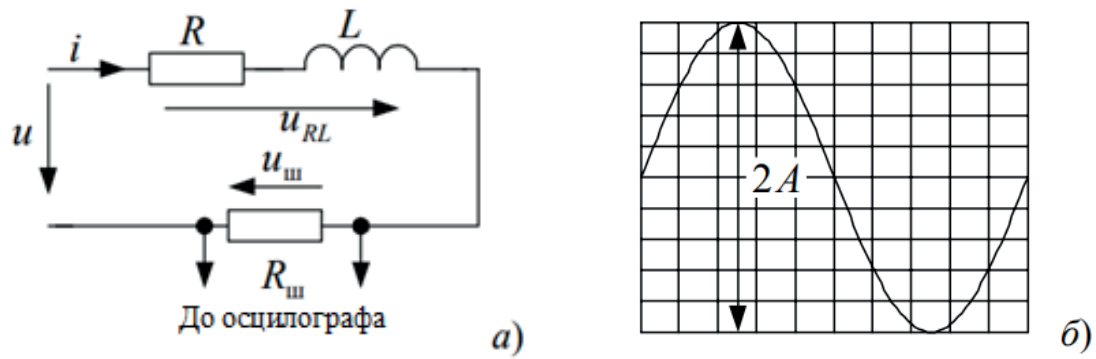


Рис. 4.3.

Розв'язання.

За осцилограмою рис. 4.3, б подвійна амплітуда напруги на шунті $2A = 10$ под. Знаходимо амплітудне значення I_m струму i :

$$I_m = \frac{2 A m_u}{2 R_{ш}} = \frac{10 \cdot 0,02}{2 \cdot 0,1} = 1 \quad \text{А.}$$

Реактивний опір X індуктивності L на частоті

$$\omega = 2 \pi f = 6,28 \cdot 1000 = 6280 \quad \text{с}^{-1}$$

рівний

$$X = \omega L = 6280 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} = 10,053 \approx 10 \quad \text{Ом.}$$

Амплітудні значення напруг u_R і u_L :

$$U_{mR} = I_m R = 10 \quad \text{В}; \quad U_{mL} = I_m X = 10 \quad \text{В.}$$

Миттєві значення складових напруги на опорі R котушки індуктивності та індуктивності L відповідно рівні ($\psi_i = 0$):

$$u_R = U_{mR} \sin \omega t = 10 \cdot \sin 6280 \cdot t \quad \text{В};$$

$$u_L = U_{mL} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = 10 \cdot \sin \left(6280 \cdot t + \frac{\pi}{2} \right) \quad \text{В};$$

Миттєве значення напруги на активному опір у фазі з струмом, на індуктивності випереджає струм на кут $\pi/2$.

Діючі значення напруг:

$$U_R = \frac{U_{mR}}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,07 \quad \text{В};$$

$$U_L = \frac{U_{mL}}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,07 \quad \text{В};$$

$$U_{RL} = \sqrt{2} \cdot 7,07 = 10 \text{ В.}$$

Векторні діаграми напруг і струму представлено на рис. 4.4.

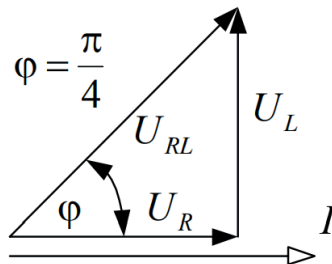


Рис. 4.4. Векторні діаграми напруг і струму

Амплітудне значення

$$U_{mRL} = \sqrt{2} \cdot 10 = 14,1 \text{ В.}$$

Початкова фаза

$$\psi_u = \phi = \arctan \frac{U_L}{U_R} = \frac{\pi}{4} \quad (\text{оскільки } \psi_i = 0),$$

відповідно

$$u_{RL} = U_{mRL} \sin\left(\omega t + \psi_u\right) = 14,1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \text{ В.}$$

Залежності $u_R(\omega t)$, $u_L(\omega t)$ та $u_{RL}(\omega t)$ представлено на рис. 4.5.

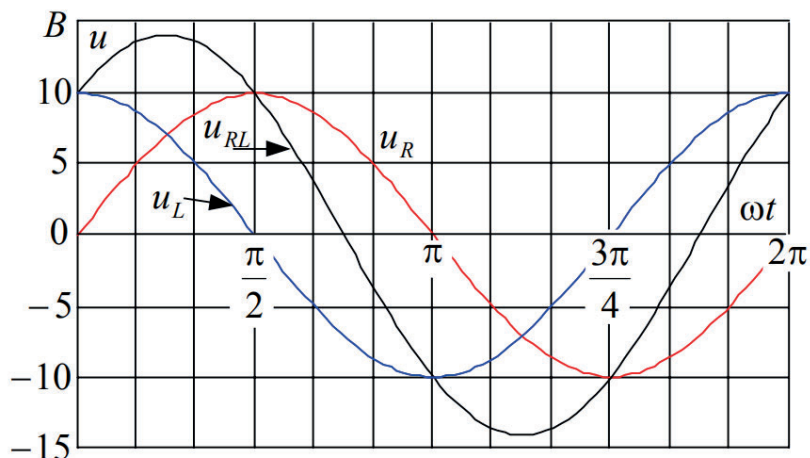


Рис. 4.5. Залежності $u_R(\omega t)$, $u_L(\omega t)$ та $u_{RL}(\omega t)$

Приклад 4.4. До електричного кола зі схемою рис. 4.6 прикладена синусоїдальна напруга $u = 141 \sin 314t$ В.

Знайти миттєві і діючі значення струму та напруги на всіх ділянках кола, якщо $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 79,62 \text{ мкФ}$.

Розв'язання.

Призначаємо позитивні напрямки струму та напруги як на рис. 4.6. Визначаємо реактивний опір X_C ємності C на частоті $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$:

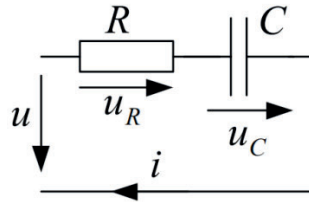


Рис. 4.6.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{314 \cdot 79,62} = 40 \text{ Ом.}$$

Повний опір кола

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \text{ Ом.}$$

Амплітудні значення:

– струму i :

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{141}{50} = 2,82 \text{ А;}$$

– напруги на резисторі R :

$$U_{mR} = I_m R = 2,82 \cdot 30 = 84,6 \text{ В;}$$

– напруги на ємності C :

$$U_{mC} = I_m X_C = 2,82 \cdot 40 = 112,8 \text{ В.}$$

Кут зсуву фаз між напругою u та струмом i

$$\phi = \arctg \frac{X_{ек}}{R} = \arctg \frac{-X_C}{R} = \arctg \frac{-40}{30} = -53^\circ$$

Початкова фаза струму i визначимо зі співвідношення $\psi_u - \psi_i = \phi$

Звідки,

$$\psi_i = -\phi = 53^\circ$$

Миттєві значення струму та напруг на ділянках кола:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = 2,82 \cdot \sin(314t + 53^\circ) \text{ А;}$$

$$u_R = U_{mR} \sin(\omega t + \psi_i) = 84,6 \cdot \sin(314t + 53^\circ) \text{ В};$$

$$u_C = U_{mC} \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ) = 112,8 \cdot \sin(314t - 37^\circ) \text{ В}.$$

Діючі значення:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 2 \text{ А}; \quad U_R = \frac{U_{mR}}{\sqrt{2}} = 60 \text{ В}; \quad U_C = \frac{U_{mC}}{\sqrt{2}} = 80 \text{ В}.$$

Приклад 4.5. Визначити діюче значення струму та активну потужність на вході пасивного двополюсника з еквівалентною активною провідністю $G = 0,011 \text{ Ом}^{-1}$ і реактивною провідністю $B = 0,016 \text{ Ом}^{-1}$. Напряга на вході двополюсника $U = 30 \text{ В}$.

Розв'язання.

Повна провідність

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{0,011^2 + 0,016^2} = 0,019 \text{ Ом}^{-1}.$$

Діюче значення струму

$$I = YU = 0,019 \cdot 30 = 0,58 \text{ А}.$$

Активна потужність

$$P = UI \cos \phi = UI \frac{G}{Y} = 30 \cdot 0,58 \cdot \frac{0,011}{0,019} = 10,1 \text{ Вт}.$$

Приклад 4.6. Діюче значення синусоїдального струму вітки з резистором R дорівнює $0,1 \text{ А}$ (рис. 4.7). Знайти діючі значення напруги u , струмів i_L та i , якщо $R = 430 \text{ Ом}$; $X_L = 600 \text{ Ом}$. Визначити активну, реактивну та повну потужності цього двополюсника?

Розв'язання.

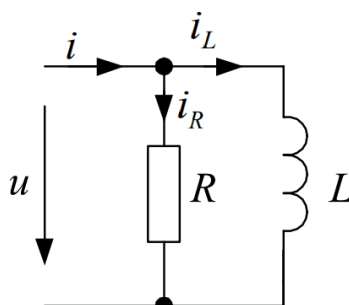


Рис. 4.7.

Позитивні напрямки напруги та струмів вказані на рис. 4.7. Діюче значення струму $I_R = 0,1 \text{ А}$.

За законом Ома

$$U = I_R R = 0,1 \cdot 430 = 43 \text{ В.}$$

Струм через котушку

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{43}{600} = 0,072 \text{ А.}$$

Повний струм

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,072^2} = 0,123 \text{ А.}$$

Діючі значення струму I можна визначити, визначивши повну провідність Y кола. За виглядом схеми

$$Y = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{430}\right)^2 + \left(\frac{1}{600}\right)^2} = 2,86 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}.$$

Струм

$$I = YU = 2,86 \cdot 10^{-3} \cdot 43 = 0,123 \text{ А.}$$

Потужності:

$$P = I_R^2 R = 43 \text{ Вт; } Q = I_L^2 X_L = 3,082 \text{ вар; } S = UI = 5,29 \text{ ВА.}$$

Виконується умова

$$P^2 + Q^2 = S^2.$$

Приклад 4.7. Діюче значення синусоїдальної напруги на ємності C в колі зі схемою рис. 4.8 $U_C = 24$ В. Знайти діючі значення напруги u та струму i , якщо $X_C = 12$ Ом; $R = 16$ Ом.

Розв'язання.

Визначаємо діюче значення струму

$$I = \frac{U_C}{X_C} = \frac{24}{12} = 2 \text{ А.}$$

Повний опір кола

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{16^2 + 12^2} = 20 \text{ Ом.}$$

Діюче значення напруги u

$$U = IZ = 2 \cdot 20 = 40 \text{ В.}$$

Приклад 4.8. Для визначення еквівалентних параметрів пасивного двополюсника в колі синусоїдального струму були зроблені вимірювання діючих значень напруги та струму активної потужності (рис. 4.8).

Показання приладів:

$$A \rightarrow 0,5 \text{ A}, U \rightarrow 100 \text{ В}, W \rightarrow 30 \text{ Вт.}$$

Для визначення характеру реактивного опору (провідності) паралельно до двополюсника була включена ємність C ($B_C < B_{ек}$). При цьому покази амперметра зменшились. Розрахувати еквівалентні опори та провідності двополюсника.

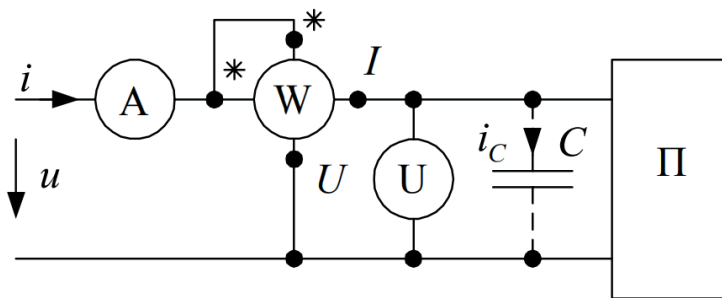


Рис. 4.8.

Діючі значення: $I = 0,5 \text{ A}$, $U = 100 \text{ В}$. Активна потужність, споживана двополюсником, $P = 30 \text{ Вт}$. Опір двополюсника

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{100}{0,5} = 200 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний активний опір

$$R_{ек} = \frac{P}{I^2} = \frac{30}{0,25} = 120 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний реактивний опір

$$X_{ек} = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{200^2 - 120^2} = 160 \text{ Ом.}$$

Характер реактивного опору індуктивний ($X_{ек} = X_L$, $\varphi > 0$). Після включення паралельно двополюсника ємності C , струм $I' < I$. Цьому випадку відповідає векторна діаграма рис. 4.9, а. Ємкісному характеру відповідає векторна діаграма рис. 4.9, б.

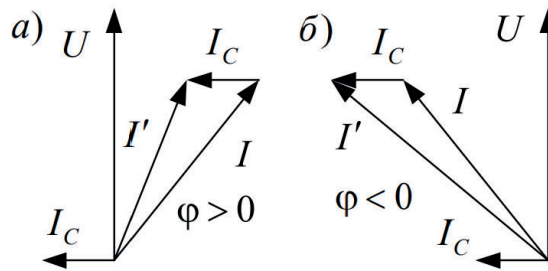


Рис. 4.9.

Повна провідність двополюсника

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{0,5}{100} = 5 \cdot 10^{-3} \quad \text{Ом}^{-1}.$$

Еквівалентна активна провідність

$$G_{ек} = \frac{P}{U^2} = \frac{30}{100^2} = 3 \cdot 10^{-3} \quad \text{Ом}^{-1}.$$

Еквівалентна реактивна провідність

$$B_{ек} = \sqrt{Y^2 - G_{ек}^2} = \sqrt{25 \cdot 10^{-6} - 9 \cdot 10^{-6}} = 4 \cdot 10^{-3} \quad \text{Ом}^{-1}.$$

Слід звернути увагу, що трикутники опорів і провідностей для одного і того ж двополюсника подібні, тому

$$\frac{R}{Z} = \frac{G}{Y} \quad \text{і} \quad \frac{X}{Z} = \frac{B}{Y}.$$

Відповідно,

$$G_{ек} = \frac{R_{ек}}{Z^2} = \frac{120}{200^2} = 3 \cdot 10^{-3} \quad \text{Ом}^{-1};$$

$$B_{ек} = \frac{X_{ек}}{Z^2} = \frac{160}{200^2} = 4 \cdot 10^{-3} \quad \text{Ом}^{-1}.$$

Приклад 4.9. До джерела змінного струму з напругою $U = 50$ В підключені послідовно три приймачі (рис. 4.10).

Визначити: струм в колі I ; спад напруги на кожному з приймачів U_1, U_2, U_3 ; коефіцієнт потужності кола $\cos \varphi$; активну P_k , реактивну Q_k і повну S_k потужності кожного приймача та всього кола (побудувати векторну діаграму напруг і струму).

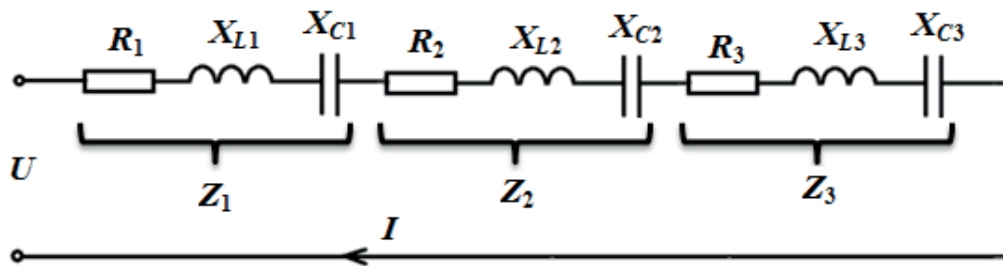


Рис. 4.10. Електрична схема

Розв'язання.

Реактивні опори приймачів:

$$X_1 = X_{L1} - X_{C1} = 12 - 2 = 10 \text{ Ом};$$

$$X_2 = X_{L2} - X_{C2} = 0 - 4 = -4 \text{ Ом};$$

$$X_3 = X_{L3} - X_{C3} = 0 - 2 = -2 \text{ Ом}.$$

Повні опори приймачів:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{2^2 + 10^2} = 10,198 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{0^2 + (-4)^2} = 4 \text{ Ом};$$

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2} = \sqrt{1^2 + (-2)^2} = 2,236 \text{ Ом}.$$

Еквівалентний повний опір:

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_1 + X_2 + X_3)^2} =$$

$$i \sqrt{(2 + 0 + 1)^2 + (10 - 4 - 2)^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом}.$$

Струм в колі:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{50}{5} = 10 \text{ А}.$$

Спад напруги на кожному з приймачів:

$$U_1 = I \cdot Z_1 = 10 \cdot 10,198 = 101,98 \text{ В};$$

$$U_2 = I \cdot Z_2 = 10 \cdot 4 = 40 \text{ В};$$

$$U_3 = I \cdot Z_3 = 10 \cdot 2,236 = 22,36 \text{ В}.$$

Активні потужності:

$$P = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I^2 = 3 \cdot 10^2 = 300 \text{ Вт};$$

$$P_1 = R_1 \cdot I^2 = 2 \cdot 10^2 = 200 \text{ Вт};$$

$$P_2 = R_2 \cdot I^2 = 0 \cdot 10^2 = 0 \text{ Вт};$$

$$P_3 = R_3 \cdot I^2 = 1 \cdot 10^2 = 100 \text{ Вт};$$

Перевіряємо:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \text{ ;}$$

$$300 \text{ Вт} = 200 \text{ Вт} + 0 \text{ Вт} + 100 \text{ Вт} \text{ ;}$$

$$300 \text{ Вт} = 300 \text{ Вт}.$$

Реактивні потужності:

$$Q = (X_1 + X_2 + X_3) \cdot I^2 = 4 \cdot 10^2 = 400 \text{ вар};$$

$$Q_1 = X_1 \cdot I_1^2 = 10 \cdot 10^2 = 1000 \text{ вар};$$

$$Q_2 = X_2 \cdot I_2^2 = (-4) \cdot 10^2 = -400 \text{ вар};$$

$$Q_3 = X_3 \cdot I_3^2 = (-2) \cdot 10^2 = -200 \text{ вар}.$$

Перевіряємо:

$$400 \text{ вар} = 1000 \text{ вар} - 400 \text{ вар} - 200 \text{ вар} \text{ ;}$$

$$400 \text{ вар} = 400 \text{ вар}.$$

Повні потужності:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{300^2 + 400^2} = 500 \text{ ВА};$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{200^2 + 1000^2} = 1020 \text{ ВА};$$

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{0^2 + (-400)^2} = 400 \text{ ВА};$$

$$S_3 = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2} = \sqrt{100^2 + (-200)^2} = 223,6 \text{ ВА}.$$

Коефіцієнти потужності кожної вітки та всього кола:

$$\cos \phi = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{Z} = \frac{3}{5} = 0,6 \text{ .}$$

$$\cos \phi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{2}{10,198} = 0,196 \text{ ;}$$

$$\cos \phi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{0}{4} = 0 \text{ ;}$$

$$\cos \phi_3 = \frac{R_3}{Z_3} = \frac{1}{2,236} = 0,447 \text{ .}$$

Будуємо векторну діаграму (рис. 4.11):

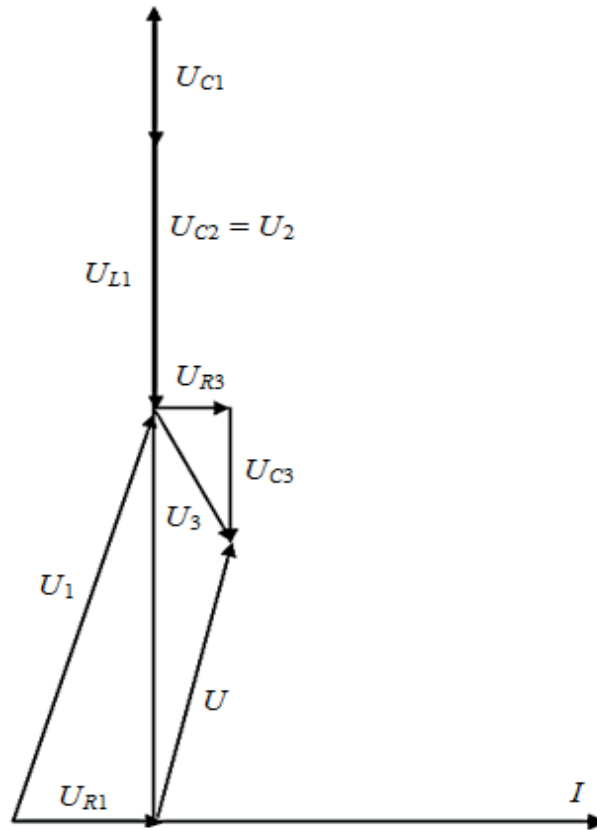


Рис. 4.11. Векторна діаграма напруг і струму

Приклад 4.10. До джерела змінного струму з напругою $U = 80$ В паралельно підключені два приймачі. Перший з них має параметри $R_1 = 4$ Ом, $X_{L1} = 4$ Ом, другий – $R_2 = 6$ Ом, $X_{C2} = 8$ Ом (рис. 4.12). Визначити: струми I_1, I_2 у вітках кола та I в нерозгалуженій частині методом провідностей; коефіцієнти потужності $\cos\varphi_1, \cos\varphi_2, \cos\varphi_3$; активну P , реактивну Q і повну S потужності приймачів і всього кола. Побудувати векторну діаграму.

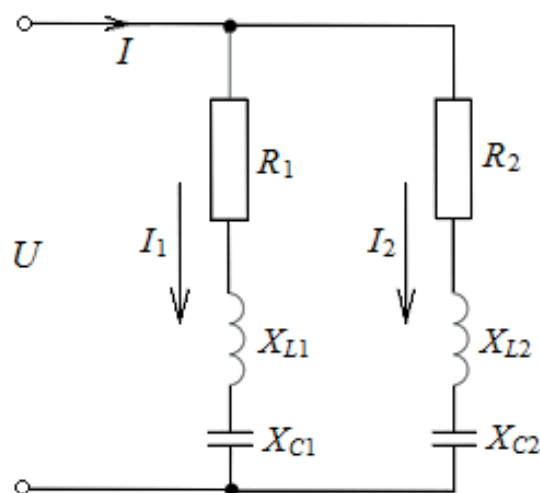


Рис. 4.12. Електрична схема

Розв'язання.

Дано:

$$U = 80 \text{ В}$$

$$R_1 = 4 \text{ Ом}$$

$$X_{L1} = 4 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 6 \text{ Ом}$$

$$X_{C2} = 8 \text{ Ом}$$

$$I_1 - ? \quad I_2 - ?$$

$$I - ? \quad \cos \varphi_1 - ?$$

$$\cos \varphi_2 - ? \quad P - ?$$

$$\cos \varphi_3 - ? \quad Q - ?$$

$$S - ?$$

Реактивні опори приймачів:

$$X_1 = X_{L1} - X_{C1} = 4 - 0 = 4 \text{ Ом};$$

$$X_2 = X_{L2} - X_{C2} = 0 - 8 = -8 \text{ Ом.}$$

Повний опір приймачів:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{4^2 + 4^2} = 5,657 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{6^2 + (-8)^2} = 10 \text{ Ом.}$$

Активні провідності приймачів:

$$g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2} = \frac{4}{32} = 0,125 \text{ См}; \quad g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{6}{100} = 0,06 \text{ См.}$$

Еквівалентна активна провідність:

$$G_{12} = G_1 + G_2 = 0,125 + 0,06 = 0,185 \text{ См.}$$

Реактивні провідності приймачів:

$$b_1 = \frac{X_1}{Z_1^2} = \frac{4}{32} = 0,125 \text{ См}; \quad b_2 = \frac{X_2}{Z_2^2} = \frac{-8}{100} = -0,08 \text{ См.}$$

Еквівалентна реактивна провідність:

$$b_{12} = b_1 + b_2 = 0,125 - 0,08 = 0,045 \text{ См} > 0,$$

отже провідність має індуктивний характер.

Еквівалентна повна провідність:

$$y_{12} = \sqrt{g_{12}^2 + b_{12}^2} = \sqrt{0,185^2 + 0,045^2} = 0,19 \text{ См.}$$

Еквівалентний активний опір:

$$R_{12} = \frac{g_{12}}{y_{12}^2} = \frac{0,185}{0,036} = 5,139 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний реактивний опір:

$$X_{12} = \frac{b_{12}}{y_{12}^2} = \frac{0,045}{0,036} = 1,25 \text{ Ом,}$$

має індуктивний характер.

Еквівалентний повний опір:

$$Z_{12} = \frac{1}{y_{12}} = \frac{1}{0,19} = 5,252 \quad \text{Ом.}$$

Сила струму в нерозгалуженій частині кола:

$$I = \frac{U}{Z_{12}} = \frac{80}{5,252} = 15,232 \quad \text{А.}$$

Струми в примачах:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{80}{5,657} = 14,142 \quad \text{А;} \quad I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{80}{10} = 8 \quad \text{А.}$$

Активні потужності:

$$P = R_{12} I^2 = 5,103 \cdot 15,232^2 = 1184 \quad \text{Вт;}$$

$$P_1 = R_1 I_1^2 = 4 \cdot 14,142^2 = 800 \quad \text{Вт;}$$

$$P_2 = R_2 I_2^2 = 6 \cdot 8^2 = 384 \quad \text{Вт;}$$

$$P = P_1 + P_2 \quad \text{Вт;}$$

$$1184 \text{ Вт} = 800 \text{ Вт} + 384 \text{ Вт} \quad ;$$

$$1184 \text{ Вт} = 1184 \text{ Вт} \quad .$$

Реактивні потужності:

$$Q = X_{12} I^2 = 1,241 \cdot 15,232^2 = 288 \quad \text{вар;}$$

$$Q_1 = X_1 I_1^2 = 4 \cdot 14,142^2 = 800 \quad \text{вар;}$$

$$Q_2 = X_2 I_2^2 = (-8) \cdot 8^2 = -512 \quad \text{вар;}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad ;$$

$$288 \text{ вар} = 800 \text{ вар} - 512 \text{ вар} \quad ;$$

$$288 \text{ вар} = 288 \text{ вар} \quad .$$

Повні потужності:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1184^2 + 288^2} = 1219 \quad \text{ВА;}$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{800^2 + 800^2} = 1131 \quad \text{ВА;}$$

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{384^2 + (-512)^2} = 640 \quad \text{ВА.}$$

Коефіцієнти потужності кожної вітки та всього кола:

$$\cos \phi = \frac{R_{12}}{Z_{12}} = \frac{5,103}{5,252} = 0,972 \quad ;$$

$$\cos \phi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{4}{5,657} = 0,707 \quad ;$$

$$\cos \phi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{6}{10} = 0,6$$

Будуємо векторну діаграму струмів та напруги (рис. 4.13):

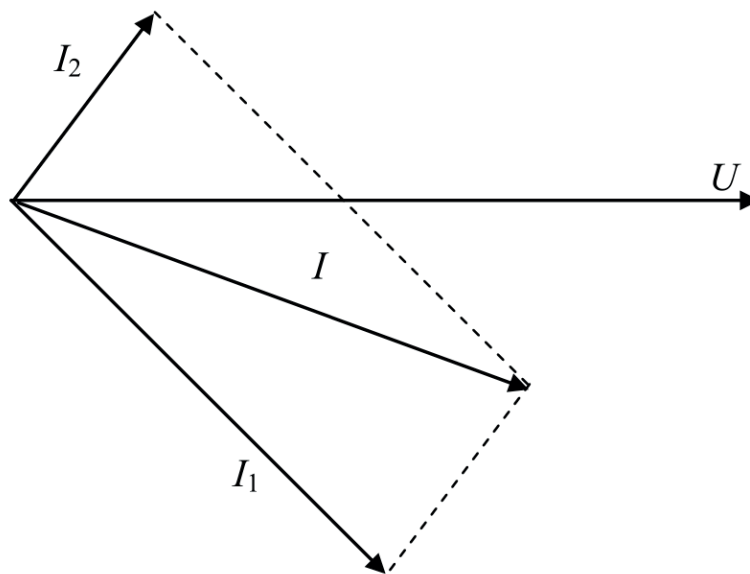


Рис. 4.13. Векторна діаграма струмів та напруги

Приклад 4.11. У трифазну мережу з напругою $U = 660$ В включені три однакових приймачі енергії (рис. 4.14). Опори приймачів $R = 40$ Ом і $X_L = 30$ Ом, $X_C = 0$.

Визначити:

1. Фазні та лінійні струми.
2. Коефіцієнт потужності, активні і реактивні потужності всього кола та кожної фази окремо.
3. Побудувати топографічні діаграми.

Завдання вирішити для випадків, коли приймачі енергії з'єднані зіркою (рис. 4.14, а), а потім трикутником (рис. 4.14, б).

Порівняти отримані результати.

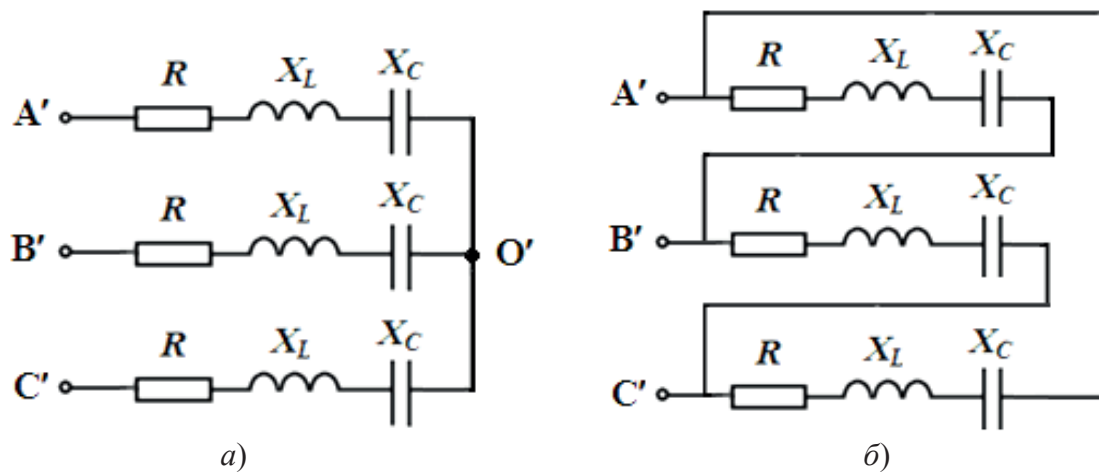


Рис. 4.14. Електрична схема

Розв'язання.

1) *Розрахунок трифазного кола при з'єднанні приймачів зіркою (рис. 4.14, а):*

$$I_{\text{л}} = I_{\phi} .$$

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\phi} .$$

1. Визначаємо фазну напругу:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 381,05 \text{ В.}$$

2. Визначаємо повний опір фаз:

$$Z_{\phi} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50 \text{ Ом.}$$

3. Визначаємо фазні та лінійні струми:

$$I_{\text{л}} = I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{381,05}{50} = 7,62 \text{ А.}$$

4. Визначаємо активні, реактивні та повні потужності фаз:

$$P_{\text{л}} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \phi ;$$

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{50} = 0,8 ;$$

$$P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \phi = 381,05 \cdot 7,62 \cdot 0,8 = 2322,88 \text{ Вт;}$$

$$Q_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \phi ;$$

$$\sin \phi = \frac{X_L}{Z} = \frac{30}{50} = 0,6 \quad ;$$

$$Q_\phi = U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \phi = 381,05 \cdot 7,62 \cdot 0,6 = 1742,16 \quad \text{вар};$$

$$S_\phi = U_\phi \cdot I_\phi = \sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2} = 381,05 \cdot 7,62 = 2903,6 \quad \text{ВА.}$$

5. Будемо топографічну діаграму (рис. 4.15)

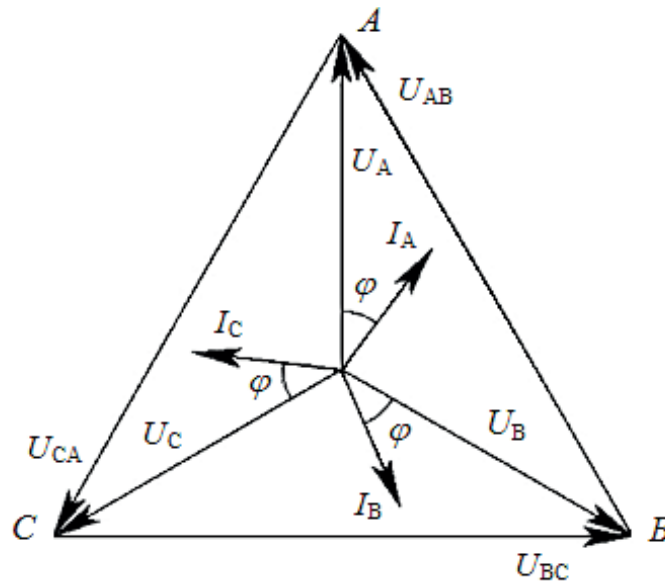


Рис. 4.15. Топографічна діаграма

2. Розрахунок трифазного кола при з'єднанні приймачів трикутником (рис. 4.14, б).

$$U_\phi = U_\phi$$

$$I_\phi = \sqrt{3} I_\phi$$

1. Визначаємо фазні та лінійні струми:

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi} = \frac{660}{50} = 13,2 \quad \text{А.}$$

$$I_\phi = \sqrt{3} I_\phi = \sqrt{3} \cdot 13,2 = 22,86 \quad \text{А.}$$

2. Визначаємо активні, реактивні та повні потужності:

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \phi = 3 \cdot 660 \cdot 13,2 \cdot 0,8 = 20908,8 \quad \text{Вт};$$

$$Q = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \phi = 3 \cdot 660 \cdot 13,2 \cdot 0,6 = 15681,6 \quad \text{вар};$$

$$S = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi = 3 \cdot 660 \cdot 13,2 = 26136 \quad \text{ВА.}$$

3. Будуємо топографічну діаграму (рис. 4.16).

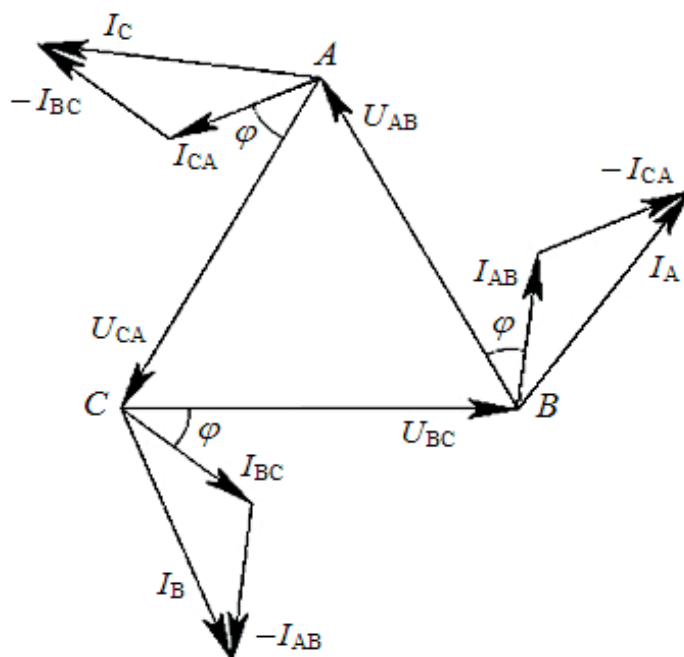


Рис. 4.16. Топографічна діаграма

3. Порівнюємо отримані результати:

При з'єднанні приймачів трикутником лінійні струми в 3 рази, а фазні струми в $\sqrt{3}$ рази більші, ніж при з'єднанні цих приймачів зіркою [45]:

$$I_{\text{ф.трик.}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф.зірка}} ,$$

$$I_{\text{л.трик.}} = 3 \cdot I_{\text{л.зірка}} .$$

Активні, реактивні й повні потужності всього навантаження при з'єднанні приймачів трикутником в 3 рази більші, ніж при з'єднанні цих приймачів зіркою [46]:

$$P_{\text{трик.}} = 3 \cdot P_{\text{зірка}} ,$$

$$Q_{\text{трик.}} = 3 \cdot Q_{\text{зірка}} ,$$

$$S_{\text{трик.}} = 3 \cdot S_{\text{зірка}} .$$

Приклад 4.12. Спад напруги на первинній обмотці понижувального трансформатора 220 В, потужність 44 Вт. Визначити силу струму у вторинній

обмотці, якщо відношення числа витків обмоток $k = w_1/w_2 = 5$. (Втрати енергії не враховувати).

Розв'язання.

Дано:
$U_1 = 220$ В
$P_1 = 44$ Вт
$k = w_1/w_2 = 5$
I_2 — ?

Напруга на вторинній обмотці дорівнюватиме

$$U_2 = \frac{U_1}{k} = \frac{220}{5} = 44 \text{ В.}$$

Якщо вважати, що втрат немає, то потужність у вторинній обмотці рівна потужності на первинній $P_2 = P_1$, отже, струм становитиме

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{44}{44} = 1 \text{ А.}$$

Приклад 4.13. Номінальні значення первинної і вторинної напруг однофазного трансформатора $U_{1\text{ном}} = 110$ кВ і $U_{2\text{ном}} = 6,3$ кВ, номінальний первинний струм $I_{1\text{ном}} = 95,5$ А. Визначити номінальну потужність трансформатора $S_{\text{ном}}$ та номінальний вторинний струм $I_{2\text{ном}}$.

Розв'язання.

Дано:
$U_{1\text{ном}} = 110$ кВ
$U_{2\text{ном}} = 6,3$ кВ
$I_{1\text{ном}} = 95,5$ А
$S_{\text{ном}}$ — ?
$I_{2\text{ном}}$ — ?

Номінальна потужність трансформатора

$$S_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} \cdot I_{1\text{ном}} = 110 \cdot 95,5 = 10505 \text{ кВА.}$$

Номінальний вторинний струм

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{10505}{6,3} = 1667 \text{ А.}$$

Приклад 4.14. Понижувальний трансформатор увімкнений в коло напругою 1000 В і споживає потужність 400 Вт. Визначити коефіцієнт корисної дії трансформатора, якщо струм у вторинній обмотці 3,8 А, а $w_1/w_2 = 10$?

Розв'язання.

Дано:
$U_1 = 1000$ В
$P_1 = 400$ Вт
$I_2 = 3,8$ А
$w_1/w_2 = 10$
η — ?

Визначимо напругу у вторинній обмотці:

$$U_2 = \frac{U_1}{k} = \frac{1000}{10} = 100 \text{ В.}$$

ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \cdot 100 = \frac{U_2 I_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{100 \cdot 3,8}{400} \cdot 100 = 95$$

Приклад 4.15. Понижувальний трансформатор ($w_1/w_2 = 10$) включений в мережу з $U_1 = 220$ В. Визначити напругу на виході трансформатора, якщо опір корисного навантаження $R = 3$ Ом, а вторинної обмотки $r = 0,3$ Ом?

Розв'язання.

Дано:	Напруга на виході буде рівною $U_2 - U_r$, де U_r – спад напруги на обмотці, $U_r = I_2 \cdot r$.
$U_1 = 220$	
В	Вторинний струм:
$R = 3$ Ом	$I_2 = \frac{U_2}{R+r} = \frac{U_1}{k(R+r)} = \frac{220}{10 \cdot 3,3} = \frac{20}{3}$ А.
$r = 0,3$ О	
М	Напруга на виході:
$w_1/w_2 = 10$	$U = U_2 - U_r = \frac{U_1}{k} - I_2 r = \frac{220}{10} - \frac{20}{3} \cdot 0,3 = 20$ В.
$U - ?$	

Приклад 4.16. Спад напруги на первинній обмотці трансформатора $U_1 = 220$ В, а величина струму $I_1 = 0,55$ А. Вторинна обмотка живить лампу розжарювання. Напруга на затискачах лампи $U_2 = 12$ В, а сила струму $I_2 = 3,6$ А. ККД трансформатора становить $\eta = 0,65$. Знайти зсув фаз ϕ_1 між силою струму та напругою в первинній обмотці трансформатора.

Розв'язання.

Дано:	Потужність, споживана первинною обмоткою трансформатора,
$U_1 = 220$	$P_1 = I_1 U_1 \cos \phi_1$
В	
$I_1 = 0,55$	Потужність, яку трансформатор віддає лампі (корисна потужність), становить:
А	$P_2 = I_2 U_2 \cos \phi_2$
$U_2 = 12$	
В	Коефіцієнт корисної дії
$I_2 = 3,6$	$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2 \cos \phi_2}{I_1 U_1 \cos \phi_1}$
А	
$\eta = 0,65$	
$\phi_1 - ?$	У даному випадку $\cos \phi_2 = 1$, оскільки лампа має тільки активний опір. Отже,

$$\cos \phi_1 = \frac{I_2 U_2}{\eta I_1 U_1} = 0,55$$

Звідси $\phi_1 = 56,7^\circ$.

Приклад 4.17. Двофазний двохобмотковий трансформатор має номінальні напруги: первинна 6,3 кВ, вторинна 0,4 кВ; максимальне значення магнітної індукції у стрижні магнітопроводу 1,5 Тл; площа поперечного перетину цього стрижня 200 см²; коефіцієнт заповнення стрижня сталлю $k_c = 0,95$. Частота змінного струму в мережі $f = 50$ Гц. Визначити коефіцієнт трансформації і число витків в обмотках трансформатора.

Розв'язання.

Дано:	Максимальне значення основного магнітного потоку
$U_1 = 6,3$ кВ	$\Phi_{\max} = B_{\max} Q_{cm} k_c = 1,5 \cdot 0,02 \cdot 0,95 = 0,0285$ Вб.
$U_2 = 0,4$ кВ	Кількість витків у вторинній обмотці трансформатора
$B_{\max} = 1,5$ Тл	$w_2 = \frac{U_1}{4,44 f \Phi_{\max}} = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0285} = 63$ вит.
$Q_{cm} = 0,02$ м ²	Коефіцієнт трансформації
$k_c = 0,95$	$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6,3}{0,4} = 15,75$
$w_1 - ?$ $w_2 - ?$	

Кількість витків у первинній обмотці трансформатора

$$w_1 = w_2 k = 63 \cdot 15,75 = 992 \text{ вит.}$$

Приклад 4.18. Номінальні значення первинної і вторинної спадів напруг однофазного трансформатора потужністю $S_{\text{ном}} = 100$ кВА становлять $U_{1\text{ном}} = 6000$ В та $U_{2\text{ном}} = 400$ В при частоті струму 50 Гц; діюче значення напруги, що припадає на один виток обмоток, $U_{\text{вит}} = 5$ В. Обчислити кількість витків обмоток трансформатора w_1 і w_2 ; поперечний переріз обмотувальних проводів первинної q_1 і вторинної q_2 обмоток, якщо густина струму в цих проводах $\Delta = 4,0$ А/мм²; площу поперечного перерізу стрижня магнітопроводу Q_{cm} , якщо максимальне значення магнітної індукції в стрижні $B_{cm} = 1,4$ Тл.

Розв'язання.

За номінальними значеннями напруг $U_{1\text{ном}}$ і $U_{2\text{ном}}$ визначаємо кількість витків обмоток:

$$w_1 = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{\text{вит}}} = \frac{6000}{5} = 1200 \quad \text{ВИТ.};$$

$$w_2 = \frac{U_{2\text{ном}}}{U_{\text{вит}}} = \frac{400}{5} = 80 \quad \text{ВИТ.}$$

Номінальні значення струмів в обмотках:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = \frac{100 \cdot 10^3}{6000} = 16,7 \quad \text{А};$$

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{100 \cdot 10^3}{400} = 250 \quad \text{А.}$$

Поперечні перерізи обмоток проводів:

$$q_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{\Delta} = \frac{16,7}{4} = 4,175 \quad \text{мм}^2;$$

$$q_2 = \frac{I_{2\text{ном}}}{\Delta} = \frac{250}{4} = 62,5 \quad \text{мм}^2;$$

Основний магнітний потік в стрижні визначимо врахувавши, що номінальна первинна напруга $U_{1\text{ном}} = E_1$:

$$\Phi_{\text{max}} = \frac{E_1}{4,44 f w_1} = \frac{6000}{4,44 \cdot 50 \cdot 1200} = 0,0225 \quad \text{Вб.}$$

Поперечний переріз стрижня магнітопроводу:

$$Q_{\text{см}} = \frac{\Phi_{\text{max}}}{k_c \cdot B_{\text{см}}} = \frac{0,0225}{0,93 \cdot 1,4} = 0,017 \quad \text{м}^2,$$

де $k_c = 0,93$ – коефіцієнт заповнення шихтованого стрижня сталлю, що враховує збільшення перерізу стрижня прошарками ізоляційного лаку між сталевими пластинами.

Приклад 4.19. Для трифазного трансформатора задано такі параметри: струм холостого ходу $I_{0\text{ном}} = 20,5$ А, номінальна напруга $U_{1\text{ном}} = 127$ В, коефіцієнт потужності холостого ходу $\cos \phi_{0\text{ном}} = 0,08$. З'єднання обмоток

трансформатора Y/Y. Визначити параметри намагнічуючого контуру при частоті змінного струму в мережі $f = 50$ Гц.

Розв'язання.

Повний опір вітки намагнічування:

$$Z_m = \frac{\dot{U}_{10}}{I_0} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_0} = \frac{127}{20,5} = 6,2 \quad \text{Ом.}$$

Активний опір намагнічуючого контуру:

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2} = Z_m \cdot \cos \phi_{0\text{ном}} = 6,2 \cdot 0,08 = 0,49 \quad \text{Ом.}$$

Індуктивний опір:

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{6,2^2 - 0,49^2} = 6,18 \quad \text{Ом.}$$

Приклад 4.20. Параметри трифазного трансформатора такі: номінальна потужність $S_{\text{ном}} = 1600$ кВА, номінальна первинна $U_{1\text{ном}} = 10$ кВ та вторинна $U_{2\text{ном}} = 0,4$ кВ напруги, максимальне значення магнітної індукції в осерді $B_{\text{max}} = 1,55$ Тл, ЕРС одного витка $E_{\text{вит}} = 5$ В. З'єднання обмоток трансформатора Y/Y, коефіцієнт заповнення осердя сталлю $k_{\text{ст}} = 0,97$. Визначити: кількість витків в обмотках; максимальне значення основного магнітного потоку; площу поперечного перерізу стрижня; номінальний струм у вторинному колі; коефіцієнт трансформації. Частота змінного струму в мережі $f = 50$ Гц,

Розв'язання.

Дано:
$S_{\text{ном}} = 1600$ кВА
$U_{1\text{ном}} = 10$ кВ
$U_{2\text{ном}} = 0,4$ кВ
$B_{\text{max}} = 1,55$ Тл
$E_{\text{вит}} = 5$ В
$f = 50$ Гц
$k_{\text{ст}} = 0,97$
$w_1 - ?$ $w_2 - ?$
$\Phi_{\text{max}} - ?$ $S_{\text{ст}} - ?$
$I_{2\text{ном}} - ?$ $k - ?$

Коефіцієнт трансформації

$$k = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{10}{0,4} = 25$$

Номінальний струм у вторинній обмотці

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{ном}}} = \frac{1600}{1,73 \cdot 0,4} = 2314,14 \quad \text{А.}$$

Максимальне значення основного магнітного потоку

$$\Phi_{\text{max}} = \frac{E_{\text{вит}}}{4,44 \cdot f \cdot w} = \frac{5}{4,44 \cdot 50 \cdot 1} = 0,0225 \quad \text{Вб.}$$

Площа поперечного перерізу стрижня

$$S_{\text{стп}} = \frac{\Phi_{\text{max}}}{B_{\text{max}} \cdot k_{\text{ст}}} = \frac{0,0225}{1,55 \cdot 0,97} = 0,015 \text{ м}^2.$$

Кількість витків вторинної обмотки

$$w_2 = \frac{U_{2\text{ном}}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{\text{max}}} = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0225} = 80 \text{ ВИТ.}$$

Кількість витків первинної обмотки

$$w_1 = k \cdot w_2 = 25 \cdot 80 = 2000 \text{ ВИТ.}$$

ЕРС одного витка можна перевірити за формулою:

$$E_{\text{вит}} = \frac{U_{2\text{ном}}}{w_2} = \frac{U_{1\text{ном}}}{w_1} = \frac{10000}{2000} = 5 \text{ В.}$$

Приклад 4.21. Однофазний понижувальний трансформатор номінальної (прохідної) потужності $S_{\text{ном}} = 15$ кВА при номінальній змінній напрузі $U_1 = 220$ В та номінальній вторинній напрузі U_2 має кількість витків в обмотці w_1 , з яких $w_2 = 130$ вит. є спільними для первинного та вторинного кола; ЕРС, яка індукується в одному витку трансформатора $E_{\text{вит}} = 0,85$ В. Визначити невідомі параметри, а також у скільки разів маса та втрати цього трансформатора менші, ніж у двохобмоткового трансформатора такої ж потужності та напруг; визначити потужності автотрансформатора, які передаються з первинного у вторинне коло електричним та електромагнітним шляхами. Струм холостого ходу не враховувати.

Розв'язання.

Дано:
$S_{\text{ном}} = 15$ кВА
$U_1 = 220$ В
$w_2 = 130$ вит.
$E_{\text{вит}} = 0,85$ В
$w_1 - ?$ $U_2 - ?$
$k_A - ?$ $I_{1\text{ном}}$
$- ?$
$I_{2\text{ном}} - ?$ $S_e - ?$
$S_{\text{елмаг}} - ?$

Кількість витків в обмотці автотрансформатора

$$w_1 = \frac{U_1}{E_{\text{вит}}} = \frac{220}{0,85} = 259 \text{ ВИТ.}$$

Вторинна напруга

$$U_2 = w_2 E_{\text{вит}} = 130 \cdot 0,85 = 110 \text{ В.}$$

Коефіцієнт трансформації автотрансформатора

$$k_A = \frac{w_1}{w_2} = \frac{259}{130} = 2,0$$

Номінальний струм у первинному колі

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = \frac{15 \cdot 10^3}{220} = 68 \text{ А.}$$

Номинальний струм у вторинному колі

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{15 \cdot 10^3}{110} = 136 \text{ А.}$$

Струм у спільній частині витків обмотки автотрансформатора

$$I_{12} = I_2 - I_1 = 136 - 68 = 68 \text{ А.}$$

Потужність, яка передається з первинного у вторинне коло електричним шляхом,

$$S_e = \frac{S_{\text{ном}}}{k_A} = \frac{15}{2,0} = 7,5 \text{ кВА.}$$

Отже, електромагнітним шляхом передається лише половина прохідної потужності, а тому, в порівнянні з двохобмотковим трансформатором номінальної потужності 15 кВА, розглянутий автотрансформатор виготовлений з активних матеріалів, маса яких у два рази менша, а отже, і втрати в ньому також менші в два рази.

Приклад 4.22. Для однофазного трансформатора номінальною потужністю $S_{\text{ном}} = 600$ кВА та номінальною первинною напругою $U_{1\text{ном}} = 31,5$ кВ, потужність короткого замикання $P_{\text{к.ном}} = 20$ кВт та напруга короткого замикання $u_{\text{к}} = 8,5\%$ розрахувати дані та побудувати графік залежності зміни вторинної напруги ΔU від коефіцієнта навантаження β , якщо коефіцієнт потужності емнісного навантаження $\cos \varphi_2 = 0,75$.

Розв'язання.

Дано:

$$S_{\text{ном}} = 600 \text{ кВА}$$

$$U_{1\text{ном}} = 31,5 \text{ кВ}$$

$$P_{\text{к.ном}} = 20 \text{ кВт}$$

$$u_{\text{к}} = 8,5\%$$

$$\cos \varphi_2 = 0,75$$

$$U_{1\text{к}} - ? \quad I_{1\text{к}} - ?$$

$$u_{\text{к.а}} - ? \quad u_{\text{к.р}}$$

$$- ?$$

$$\Delta U - ?$$

Напруга короткого замикання

$$U_{1\text{к}} = 10^{-2} u_{\text{к}} U_{1\text{ном}} = 10^{-2} \cdot 8,5 \cdot 31,5 \cdot 10^3 = 2677 \text{ В.}$$

Струм короткого замикання

$$I_{1\text{к}} = I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = \frac{600 \cdot 10^3}{31,5 \cdot 10^3} = 19 \text{ А.}$$

Коефіцієнт потужності режиму короткого замикання

$$\cos \phi_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к.ном}}}{U_{1\text{к}} I_{1\text{к}}} = \frac{20 \cdot 10^3}{2677 \cdot 19} = 0,39 \quad ; \quad \sin \phi_{\text{к}} = 0,92$$

Активна напруга короткого замикання

$$u_{к.а} = u_{к} \cos \phi_{к} = 8,5 \cdot 0,39 = 3,3 \quad \%$$

Реактивна напруга короткого замикання

$$u_{к.р} = u_{к} \sin \phi_{к} = 8,5 \cdot 0,92 = 7,8 \quad \%$$

Задаємося рядом значень коефіцієнта навантаження:

$$\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1.$$

Використовуючи ці значення розраховуємо ΔU :

$$\Delta U = \beta (u_{к.а} \cos \phi_2 - u_{к.р} \sin \phi_2)$$

знак «мінус» у формулі зумовлений ємнісним характером реактивного навантаження. В результаті одержимо

β	0	0,25	0,50	0,75	1,0
$\Delta U, \%$	0	-0,67	-1,34	-2,01	-2,68

Приклад 4.23. Понижувальний автотрансформатор має такі параметри: номінальна (прохідна) потужність $S_{ном} = 2,64$ кВА, коефіцієнт трансформації k_A , струми у первинному $I_{1ном} = 12$ А та вторинному $I_{2ном}$ колах, струм у спільній частині витків I_{12} , первинна U_1 та вторинна $U_2 = 127$ В напруги, потужність розрахункова $S_{розр}$ та передана електричним шляхом S_e . Визначити невідомі параметри.

Розв'язання.

Первинна напруга

$$U_1 = \frac{S_{ном}}{I_{1ном}} = \frac{2640}{12} = 220 \quad \text{В.}$$

Коефіцієнт трансформації

$$k_A = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{127} = 1,73$$

Вторинний струм

$$I_{2ном} = I_{1ном} k_A = 12 \cdot 1,73 = 21 \quad \text{А.}$$

Струм у спільній частині витків обмотки автотрансформатора

$$I_{12} = I_2 - I_1 = 21 - 12 = 9 \quad \text{А.}$$

Розрахункова потужність автотрансформатора

$$S_{розр} = U_2 I_{12} = 127 \cdot 9 = 1140 \quad \text{ВА.}$$

Потужність автотрансформатора, яка передається у вторинне коло електричним шляхом

$$S_e = S_{ном} - S_{розр} = 2640 - 1140 = 1500 \text{ ВА.}$$

Приклад 4.24. Трифазний силовий трансформатор ТМ-100/35 має такі параметри: повна номінальна потужність $S_{ном} = 100$ кВА; номінальні втрати потужності холостого ходу $P_{0ном} = 0,465$ кВт і короткого замикання $P_{к.ном} = 1,97$ кВт; коефіцієнт потужності навантаження $\cos \phi_2 = 0,80$. Визначити величину зменшення коефіцієнта корисної дії при номінальному навантаженні в порівнянні з його максимальним значенням.

Розв'язання.

Дано:

$S_{ном} = 100$ кВА
$P_{0ном} = 0,465$ кВт
$P_{к.ном} = 1,97$ кВт
$\cos \phi_2 = 0,80$
$\Delta_\eta - ?$

ККД у номінальному режимі ($\beta = 1$)

$$\eta_{ном} = \frac{P_{ном}}{P_{1ном}} ;$$

$$P_{1ном} = S_{ном} \cos \phi_2 = 100 \cdot 0,80 = 80 \text{ кВт;}$$

$$P_{ном} = P_{1ном} - (P_{0ном} + P_{к.ном}) = 80 - (0,465 + 1,95) = 77,6 \text{ кВт.}$$

$$\eta_{ном} = \frac{77,6}{80} = 0,97$$

Визначимо максимальний ККД за формулою

$$\eta_{max} = \frac{\beta' S_{ном} \cos \phi_2}{\beta' S_{ном} \cos \phi_2 + 2 P_{0ном}}$$

Коефіцієнт навантаження, що відповідає максимальному ККД,

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_{0ном}}{P_{к.ном}}} = \sqrt{\frac{0,465}{1,97}} = 0,485$$

Тоді

$$\eta_{max} = \frac{0,485 \cdot 100 \cdot 0,80}{0,485 \cdot 100 \cdot 0,80 + 2 \cdot 0,465} = 0,98$$

Величина зменшення ККД при номінальному навантаженні в порівнянні з його максимальним значенням

$$\Delta_\eta = 0,98 - 0,97 = 0,01 \text{ , тобто 1\%.}$$

Приклад 4.25. Трифазних трансформаторів серії ТСЗ-160/6 (трансформатор трифазний сухий із заземленою первинною обмоткою) має такі технічні параметри: повна номінальна потужність $S_{ном} = 160$ кВА; номінальна первинна $U_{1ном} = 6$ В та вторинна $U_{2ном} = 0,23$ В напруги; номінальні втрати потужності короткого замикання $P_{к.ном} = 2,7$ кВт і холостого ходу $P_{0ном} = 0,7$ кВт; струм холостого ходу $i_0 = 4,0$ %; напруга короткого замикання $u_k = 5,5$ %. Порахувати: коефіцієнт трансформації k ; номінальні значення струмів первинної $I_{1ном}$ та вторинної $I_{2ном}$ обмоток; величину струму холостого ходу $I_{0ном}$; величину напруги короткого замикання $U_{к.ном}$; опір короткого замикання Z_k і його активну r_k та індуктивну складові x_k ; визначити зміну номінальної напруги при значеннях коефіцієнта потужності навантаження $\cos \phi_2 = 1; 0,8$ (інд.) та $0,8$ (ємн.); номінальні та максимальні значення ККД трансформатора при коефіцієнтах потужності $\cos \phi_2 = 1$ і $0,8$.

Розв'язання.

Дано:

$$S_{ном} = 160 \text{ кВА}$$

$$U_{1ном} = 6 \text{ В}$$

$$U_{2ном} = 0,23 \text{ В}$$

$$P_{0ном} = 0,7 \text{ кВт}$$

$$P_{к.ном} = 2,7 \text{ кВт}$$

$$u_k = 5,5 \text{ \%}$$

$$i_0 = 4,0 \text{ \%}$$

$$k - ? \quad I_{1ном} - ?$$

$$I_{2ном} - ? \quad I_{0ном} - ?$$

$$r_k - ? \quad x_k - ? \quad Z_k - ?$$

$$U_{к.ном} - ? \quad \Delta U_{ном} - ?$$

$$\eta_{ном} - ? \quad \eta_{max} - ?$$

Коефіцієнт трансформації

$$k = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{6}{0,23} = 26$$

Номінальний струм у первинній обмотці

$$I_{1ном} = \frac{S_{1ном}}{\sqrt{3} U_{1ном}} = \frac{160}{1,73 \cdot 6} = 15,4 \text{ А.}$$

Номінальний струм у вторинній обмотці

$$I_{2ном} = I_{1ном} k = 15,4 \cdot 26 = 400 \text{ А.}$$

Величина струму холостого ходу

$$I_0 = \frac{i}{100} I_{1ном} = \frac{4}{100} \cdot 15,4 = 0,6 \text{ А.}$$

Величина напруги короткого замикання

$$U_{1к} = \frac{u_k}{100} U_{1ном} = \frac{5,5}{100} \cdot 6000 = 330 \text{ В.}$$

Величина опору короткого замикання

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{\sqrt{3}I_{1ном}} = \frac{330}{\sqrt{3} \cdot 15,4} = 12,4 \quad \text{Ом.}$$

Коефіцієнт потужності короткого замикання

$$\cos \phi_k = \frac{P_{к.ном}}{\sqrt{3}U_{1к} I_{1ном}} = \frac{2700}{\sqrt{3} \cdot 330 \cdot 15,4} = 0,31 \quad ; \quad \sin \phi_k = 0,95$$

Активний та реактивний опори короткого замикання

$$r_k = Z_k \cos \phi_k = 12,4 \cdot 0,31 = 3,8 \quad \text{Ом;}$$

$$x_k = Z_k \sin \phi_k = 12,4 \cdot 0,95 = 11,8 \quad \text{Ом.}$$

Активна та реактивна напруги короткого замикання

$$u_{к.а} = u_k \cos \phi_k = 5,5 \cdot 0,31 = 1,7 \quad \%;$$

$$u_{к.р} = u_k \sin \phi_k = 5,5 \cdot 0,95 = 5,2 \quad \%.$$

Величина зміни вторинної напруги трансформатора при номінальному навантаженні ($\beta = 1$):

при коефіцієнті потужності навантаження $\cos \phi_2 = 1$, $\sin \phi_2 = 0$

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а} \cos \phi_2 + u_{к.р} \sin \phi_2 = 1,7 \cdot 1 + 0 = 1,7 \quad \%;$$

при коефіцієнті потужності навантаження $\cos \phi_2 = 0,8$ (інд.), $\sin \phi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а} \cos \phi_2 + u_{к.р} \sin \phi_2 = 1,7 \cdot 0,8 + 5,2 \cdot 0,6 = 4,48 \quad \%;$$

при коефіцієнті потужності навантаження $\cos \phi_2 = 0,8$ (ємн.),
 $\sin \phi_2 = -0,6$

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а} \cos \phi_2 + u_{к.р} \sin \phi_2 = 1,7 \cdot 0,8 + 5,2 \cdot (-0,6) = -1,8 \quad \%.$$

Результати розрахунку зміни вторинної напруги трансформатора $\Delta U_{ном}$ при номінальному навантаженні ($\beta = 1$):

$\cos \phi_2$	1,0	0,8 (інд.)	0,8 (ємн.)
$\Delta U_{ном}, \%$	1,7	4,48	-1,8
$\Delta U_{ном}, \text{В}$	3,9	10,3	-4,14
$U_2 = U_{2ном} - \Delta U_{ном}, \text{В}$	226	220	234

Зовнішні характеристики трансформатора представлено на рис. 4.17.

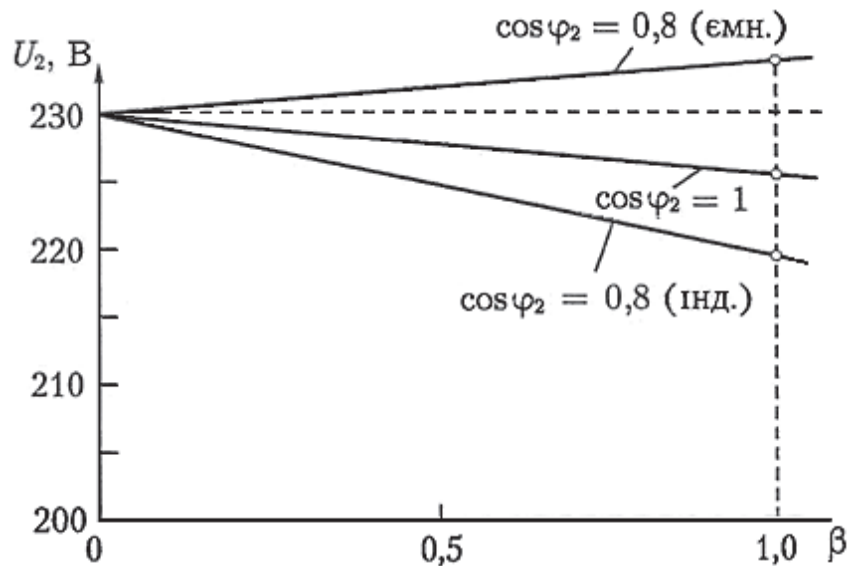


Рис. 4.17. Зовнішні характеристики трансформатора

ККД трансформатора при номінальному навантаженні ($\beta = 1$) та коефіцієнті потужності $\cos \phi_2 = 1$

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \phi_2}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \phi_2 + P_{0\text{НОМ}} + \beta^2 P_{\text{к.НОМ}}} = \frac{1 \cdot 160 \cdot 1}{1 \cdot 160 \cdot 1 + 0,7 + 1^2 \cdot 2,7} = 0,98$$

при номінальному навантаженні та коефіцієнті потужності $\cos \phi_2 = 0,8$

$$\eta = \frac{1 \cdot 160 \cdot 0,8}{1 \cdot 160 \cdot 0,8 + 0,7 + 1^2 \cdot 2,7} = 0,974$$

Максимальний ККД:

при $\cos \phi_2 = 1$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\beta' S_{\text{НОМ}} \cos \phi_2}{\beta' S_{\text{НОМ}} \cos \phi_2 + 2 P_{0\text{НОМ}}} = \frac{0,51 \cdot 160 \cdot 1}{0,51 \cdot 160 \cdot 1 + 2 \cdot 0,7} = 0,983$$

при $\cos \phi_2 = 0,8$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{0,51 \cdot 160 \cdot 0,8}{0,51 \cdot 160 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,7} = 0,979$$

де $\beta' = \sqrt{\frac{P_{0\text{НОМ}}}{P_{\text{к.НОМ}}}} = \sqrt{\frac{0,7}{2,7}} = 0,51$

— коефіцієнт навантаження, що відповідає максимальному ККД.

4.2. Тестові завдання

1. Активний опір позначається:

а) X ; б) Z ; в) R .

2. Реактивний опір позначається:

а) X ; б) Z ; в) R .

3. Індуктивність визначається за формулою:

а) $C = \frac{1}{2fX_c}$; б) $L = \frac{X_L}{2f}$; в) $P = I^2 R$.

4. Ємнісний опір визначається формулою:

а) $C = \frac{1}{2fX_c}$; б) $C = \frac{1}{2f_c}$; в) $X_c = \frac{1}{2fC}$.

5. Загальний опір кола змінного струму визначається за формулою:

а) $R = \frac{U}{I}$; б) $Z = R^2 + X^2$; в) $Z = \left(R^2 + (X_L - X_C)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$.

6. Активна потужність кола визначається за формулою:

а) $Q = I^2 \cdot X$; б) $S = U \cdot I$; в) $P = I^2 \cdot R$.

7. Діюче значення струму визначається за формулою:

а) $I = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$; б) $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$; в) $I_m = \frac{U_m}{R}$.

8. При послідовному з'єднанні конденсаторів загальна ємність дорівнює:

а) $C = C_1 + C_2$; б) $C = \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_2}{C_1}$; в) $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$.

9. Енергія зарядженого конденсатора дорівнює:

а) $W = \frac{qm^2}{2C}$; б) $W = \frac{mv^2}{2}$; в) $W = \frac{C^2 U}{2}$.

10. Закон Ома для кола змінного струму має вигляд:

$$\text{а) } I = \frac{R}{Z} \quad ; \text{ б) } I = \frac{U}{R} \quad ; \text{ в) } I_m = \frac{U_m}{Z} .$$

11. Закон Ома для кола з послідовним з'єднанням активного опору і котушки індуктивності визначається за формулою:

$$\text{а) } S = U \cdot I \quad ; \text{ б) } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad ; \text{ в) } Z = R^2 + X^2 .$$

12. Миттєве значення сили струму в колі змінного струму визначається за формулою:

$$\text{а) } i = i(t) \quad ; \text{ б) } I = \frac{U}{R} \quad ; \text{ в) } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} .$$

13. У колі змінного струму, що містить ємність коливання сили струму:

- а) випереджають коливання напруги на 90° ;
- б) відстають від коливання напруги 90° ;
- в) збігаються по фазі.

14. Індуктивний опір визначається за формулою:

$$\text{а) } X_L = 2fL \quad ; \text{ б) } X_L = \frac{L}{2f} \quad ; \text{ в) } X_L = \frac{1}{2fL} .$$

15. Реактивна потужність кола визначається за формулою:

$$\text{а) } S = U \cdot I \quad ; \text{ б) } Q = I^2 \cdot X \quad ; \text{ в) } P = I^2 \cdot R .$$

16. При паралельному з'єднанні резисторів загальний опір виражається формулою:

$$\text{а) } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad ; \text{ б) } R = R_1 + R_2 \quad ; \text{ в) } R = \frac{R_1 R_2}{R_1} + R_2 .$$

17. Середня потужність змінного струму визначається за формулою:

$$\text{а) } P = U \cdot I \cdot \cos \phi \quad ; \text{ б) } Q = I^2 \cdot X \quad ; \text{ в) } P = I^2 \cdot R .$$

18. У колі змінного струму, що містить активний опір коливання сили струму і напруги:

- а) збігаються по фазі;

б) зсунуті на π ;

в) зсунуті на $\frac{\pi}{2}$.

19. Задані струм i і напруга: $i = i_{\max} \sin t$, $u = u_{\max} \sin(t + 30^\circ)$. Визначте кут зсуву фаз.

а) 0° ; б) 30° ; в) 60° ; г) 150° .

20. Амплітуда синусоїдальної напруги 100 В, початкова фаза становить – 60° , частота 50 Гц. Запишіть рівняння миттєвого значення цієї напруги.

а) $u = 100 \cos(-60t)$; б) $u = 100 \sin(50t - 60)$;

в) $u = 100 \sin(314t - 60)$; г) $u = 100 \cos(314t + 60)$.

21. Повна споживана потужність навантаження $S = 140$ кВт, а реактивна потужність $Q = 95$ кВАр. Визначити коефіцієнт навантаження.

а) $\cos \varphi = 0,6$; б) $\cos \varphi = 0,3$; в) $\cos \varphi = 0,1$; г) $\cos \varphi = 0,9$.

22. Напруга на затискачах кола з резистивним елементом змінюється за законом: $u = 100 \sin(314t + 30^\circ)$. Визначити закон зміни струму в колі, якщо $R = 20$ Ом.

а) $i = 5 \sin 314t$; б) $i = 5 \sin(314t + 30^\circ)$;

в) $i = 3,55 \sin(314t + 30^\circ)$; г) $i = 3,55 \sin 314t$.

23. Амплітудне значення струму $I_{\max} = 5$ А, а початкова фаза $\varphi_0 = 30^\circ$. Запишіть вираз для миттєвого значення цього струму.

а) $I = 5 \cos 30t$; б) $I = 5 \sin 30^\circ$;

в) $I = 5 \sin(t + 30^\circ)$; г) $I = 5 \cos(t + 30^\circ)$.

24. Конденсатор ємністю C підключений до джерела синусоїдального струму. Як зміниться струм в конденсаторі, якщо частоту синусоїдального струму зменшити в 3 рази.

а) зменшиться в 3 рази; б) збільшиться в 3 рази;

в) залишиться незмінним; г) струм в конденсаторі не залежить від частоти синусоїдального струму.

25. Як зміниться зсув фаз між напругою і струмом на котушці індуктивності, якщо обидва її параметра (R та X_L) одночасно зростуть у два рази?

- а) зменшиться в два рази; б) збільшиться в два рази;
в) не зміниться; г) зменшиться в чотири рази.

26. Котушка з індуктивністю L підключена до джерела синусоїдальної напруги. Як зміниться струм в котушці, якщо частота джерела збільшиться в 3 рази?

- а) зменшиться в 2 рази; б) збільшиться в 3 рази;
в) не зміниться; г) зменшиться в 3 рази.

27. Чому дорівнює струм у нульовому проводі в симетричному трифазному колі при з'єднанні навантаження в зірку?

- а) номінальному струму однієї фази; б) нулю;
в) сумі номінальних струмів двох фаз; г) Сумі номінальних струмів трьох фаз.

28. Симетричне навантаження з'єднане трикутником. При вимірюванні фазного струму амперметр показав 10 А. Чому буде дорівнює струм у лінійному проводі?

- а) 10 А; б) 17,3 А; в) 14,14 А; г) 20 А.

29. У трифазному колі лінійна напруга 220 В, лінійний струм 2А, активна потужність 380 Вт. Знайти коефіцієнт потужності.

- а) $\cos\varphi = 0,8$; б) $\cos\varphi = 0,6$; в) $\cos\varphi = 0,5$; г) $\cos\varphi = 0,4$.

30. Лінійний струм дорівнює 2,2 А. Розрахувати фазний струм, якщо симетричне навантаження з'єднане зіркою.

- а) 2,2 А; б) 1,27 А; в) 3,8 А; г) 2,5 А.

31. У симетричному трифазному колі лінійний струм 2,2 А. Розрахувати фазний струм, якщо навантаження з'єднане трикутником.

а) 2,2 А; б) 1,27 А; в) 3,8 А; г) 2,5 А.

32. Кут зсуву фаз між трьома синусоїдальними ЕРС, що утворюють трифазну симетричну систему становить:

а) 150°; б) 120°; в) 240°; г) 90°.

1. На якому законі оснований принцип дії трансформатора?

- 1) на законі Ома;
- 2) на законі електромагнітної індукції;
- 3) на законі Ленца.

33. З якою метою на електростанціях на початку лінії електропередачі (ЛЕП) встановлюються підвищувальні трансформатори?

- 1) для зменшення витрат проводів на ЛЕП;
- 2) для підвищення коефіцієнта потужності системи;
- 3) для зменшення витрат потужності в проводах ЛЕП;
- 4) для зменшення капітальних витрат на спорудження ЛЕП.

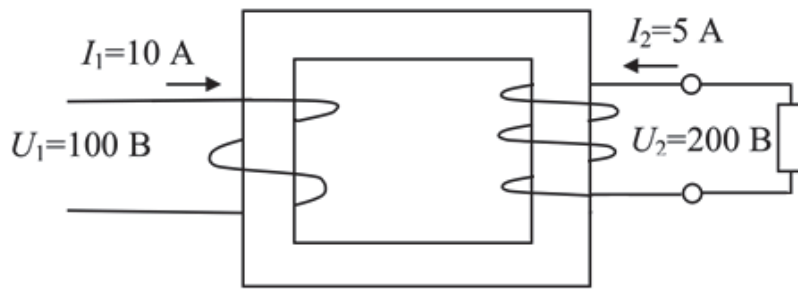
34. При якій напрузі доцільно: а) передавати електроенергію; б) споживати електроенергію?

- 1) а) високій, б) низькій;
- 2) а) низькій, б) високій;
- 3) це залежить від характеру струму.

35. Чому дорівнює відношення напруг на контактах первинної і вторинної обмоток у режимі холостого ходу трансформатора?

- 1) відношенню кількості витків обмоток;
- 2) наближено відношенню кількості витків обмоток.

36. Який це трансформатор?



1) понижувальний, оскільки струм у вторинній обмотці менший від струму в первинній обмотці;

2) підвищувальний, оскільки напруга у вторинній обмотці більша від напруги в первинній обмотці.

37. Чи може напруга на контактах вторинної обмотки перевищувати:

а) ЕРС E_1 первинної обмотки; б) ЕРС E_2 вторинної обмотки?

- 1) а) може, б) може;
- 2) а) не може, б) не може;
- 3) а) може, б) не може;
- 4) а) не може, б) може.

38. Яке рівняння пов'язує магнітний потік в осерді трансформатора з діючим значенням ЕРС в обмотці трансформатора?

- 1) $e = E_m \cdot \sin \omega t$;
- 2) $d\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \cdot \sin \omega t dt$;
- 3) $E = 4,44 f \omega \Phi$;
- 4) інше рівняння.

39. Для якого режиму роботи трансформатора коефіцієнт трансформації можна визначити за відношенням напруг вторинної та первинної обмоток?

- 1) режиму короткого замикання;
- 2) режиму холостого ходу;
- 3) навантажувального режиму.

40. Як змінюється струм у первинній обмотці трансформатора при збільшенні струму у вторинній обмотці?

- 1) залишається незмінним;

- 2) збільшується;
- 3) зменшується.

41. Як змінюється величина магнітного потоку в магнітопроводі трансформатора при збільшенні навантаження у вторинній обмотці?

- 1) залишається незмінною;
- 2) збільшується;
- 3) зменшується.

42. У яких режимах працюють первинна та вторинна обмотки трансформатора?

- 1) первинна та вторинна в режимі генератора;
- 2) первинна та вторинна в режимі приймача енергії;
- 3) первинна в режимі генератора, вторинна в режимі приймач енергії;
- 4) первинна в режимі приймача енергії, вторинна в режимі генератора.

43. У первинній обмотці трансформатора є $w_1 = 600$ витків, коефіцієнт трансформації $k_{тр} = 20$. Визначити кількість витків у вторинній обмотці.

- 1) 30; 2) 0,03; 3) 12000; 4) 100.

44. У понижувальному трансформаторі напруги з 220 В до 6,3 В, застосовані провідники перерізом $S_1 = 1 \text{ мм}^2$ та $S_2 = 9 \text{ мм}^2$. Обмотці вищої чи нижчої напруги належить провід перерізом $S_1 = 1 \text{ мм}^2$?

- 1) обмотці вищої напруги;
- 2) обмотці нижчої напруги.

45. Для перетворення напруги на початку та в кінці ЛЕП встановили трансформатори з коефіцієнтом трансформації $k_{тр} = 26$. У скільки разів зменшаться втрати в проводах ЛЕП, якщо передана потужність і перетин проводів залишилися такими ж, як до встановлення трансформаторів?

- 1) 676; 2) 52; 3) 13; 4) 10.

46. Які рівняння відповідають роботі однофазного трансформатора з навантаженням?

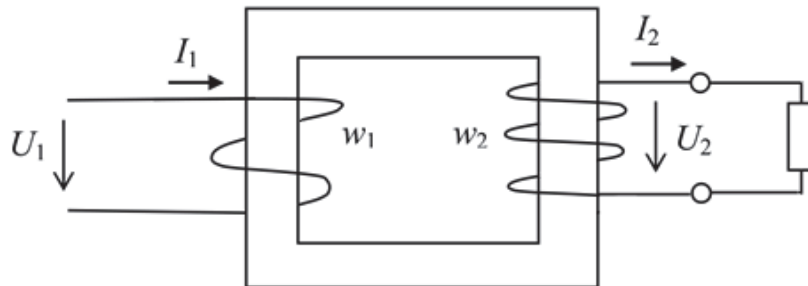
- 1) $\bar{U}_1 = \bar{E}_1 - \bar{I}_1 \bar{Z}_1$, $\bar{U}_2 = \bar{E}_2 + \bar{I}_2 \bar{Z}_2$;

- 2) $\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + \bar{I}_1 Z_1$, $\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 Z_2$;
 3) $\bar{U}_1 = \bar{E}_1 - \bar{I}_1 Z_1$, $\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 Z_2$;
 4) $\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + \bar{I}_1 Z_1$, $\bar{U}_2 = \bar{E}_2 + \bar{I}_2 Z_2$.

47. Як зміниться величина магнітного потоку в осерді трансформатора при зростанні струму у вторинній обмотці в 3 рази?

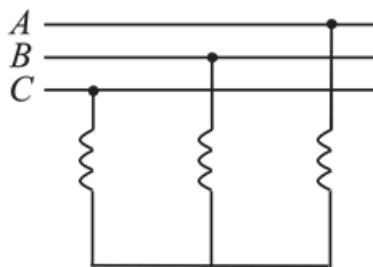
- 1) збільшиться в 3 рази;
 2) зменшиться в 3 рази;
 3) не зміниться.

48. У якому рівнянні для трансформатора допущена помилка?



- 1) $\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 Z_1$, 2) $\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 Z_2$;
 3) $E_1 = 4,44f_1 w_1 \Phi$; 4) $E_2 = 4,44f_1 w_2 \Phi$

49. Як з'єднані ці обмотки трансформатора?

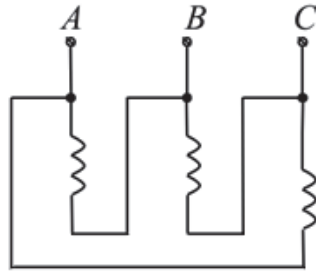


- 1) «зіркою»; 2) «трикутником»; 3) іншим способом.

50. Число витків у кожній фазі первинної обмотки трифазного трансформатора $w_1 = 1000$, у кожній фазі вторинної обмотки $w_2 = 200$. Лінійна напруга мережі 1000 В. Визначити лінійну напругу на виході трансформатора за умови, що первинна та вторинна обмотки з'єднані за схемою «зірка».

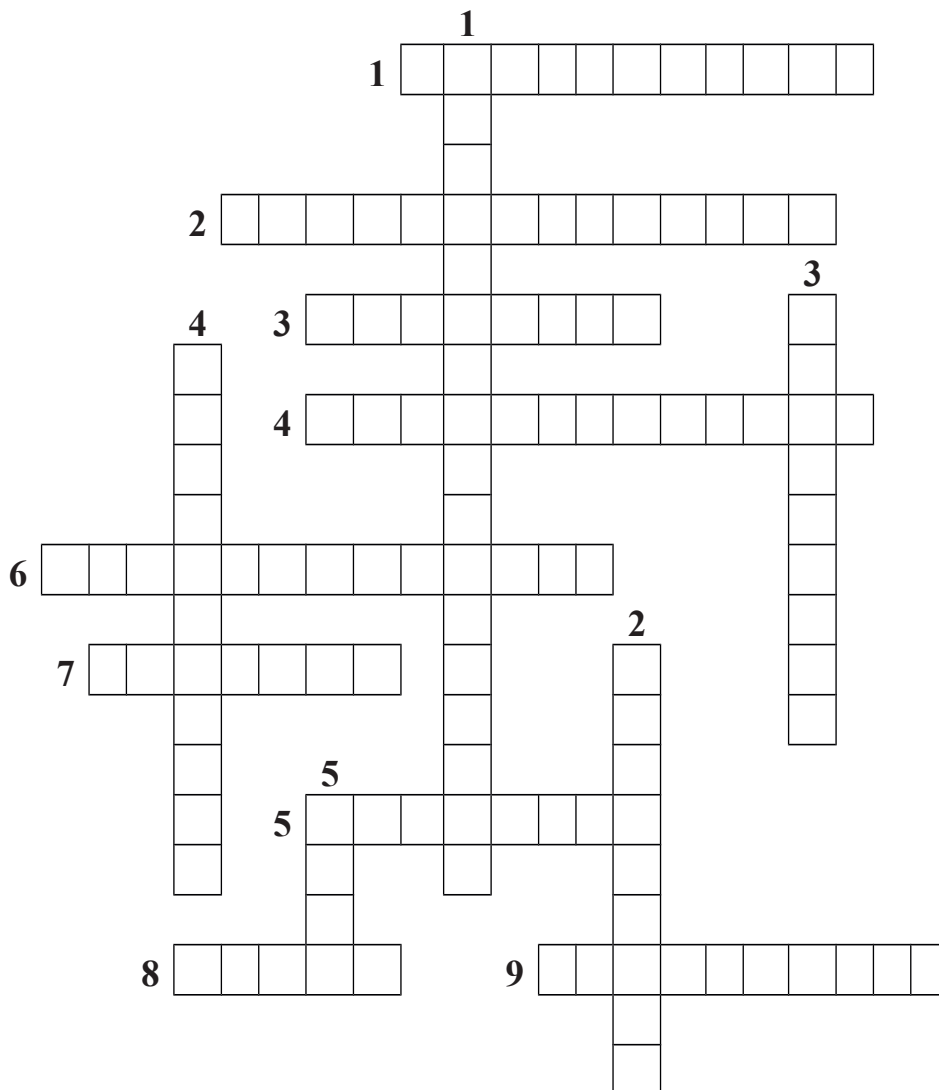
- 1) 200 В; 2) 5000 В; 3) для розв'язання задачі недостатньо даних.

51. Як з'єднані ці обмотки трансформатора?



1) «зіркою»; 2) «трикутником»; 3) іншим способом.

52. Розв'яжіть кросворд



По горизонталі:

1. Посудина циліндричної форми, яка встановлена на кришці баку з мастилом і сполучена з ним.
2. Явище на якому основана робота трансформатора.
3. Безпосередньо на ньому розташовані обмотки трансформатора.
4. Пристрій для зміни величини напруги.

5. Він винайшов трансформатор.
6. Його збирають з листів електротехнічної сталі завтовшки 0,32 – 0,5 мм.
7. Які трансформатори використовуються для живлення електроенергією житлових приміщень.
8. Трансформатор невеликої потужності з водяним охолодженням.
9. Як називається трансформатор, якщо його коефіцієнт трансформації $k > 1$.

По вертикалі:

1. Трансформатор, в якому кінець однієї обмотки електрично з'єднаний з початком другої.
2. Обмотка, з'єднана з джерелом енергії.
3. Обмотка, з'єднана з навантаженням.
4. Режим роботи трансформатора, коли первинна обмотка включена під номінальну напругу, а в коло вторинної обмотки включене навантаження.
5. Як називають верхню частину магнітопроводу.

4.3. Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Напруга на індуктивності $L=0,1$ Гн в колі синусоїдального струму змінюється за законом $u_L=141 \sin(1000t-30^\circ)$. Знайти миттєве значення струму в індуктивності.

Задача 2. Струм в ємності $C = 0,1$ мкФ становить $i=0,1 \sin(400t+\pi/3)$ А. Знайти миттєве значення напруги на ємності.

Задача 3. На ділянці кола з послідовно включеними активним опором $R = 160$ Ом та ємністю $C = 26,54$ мкФ миттєве значення синусоїдального струму $i=0,1 \sin 314t$ А. Знайти миттєві значення напруг на ємності та на всій ділянці кола. Визначити діючі значення цих величин?

Задача 4. На ділянці кола послідовно включені опір $R = 1000$ Ом та індуктивність $L = 0,12$ Гн. Діюче значення синусоїдальної напруги $U_R = 10$ В. Частота $f = 1000$ Гц. Знайти діючі значення струму та напруги на ділянці кола.

Задача 5. Обчислити діюче значення струму та активну потужність на вході пасивного двополюсника з еквівалентним активним опором $R = 160$ Ом та еквівалентним реактивним опором $X = 120$ Ом. Напруга на вході двополюсника $U = 20$ В.

Задача 6. Знайти діюче значення струму i в електричних колах зі схемами рис. 4.18, а, б, в. $U=100$ В, $R=80$ Ом, $X_L=100$ Ом, $X_C=60$ Ом.

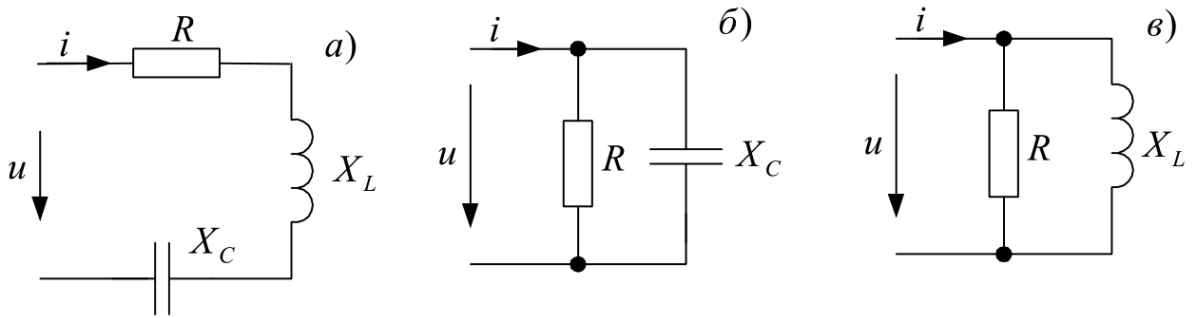


Рис. 4.18.

Задача 7. До джерела змінного струму з $U = 260$ В підключена котушка RL з активним опором $R = 5$ Ом та індуктивним опором $X_L = 12$ Ом.

Визначити струм, активну і реактивну складові напруги, коефіцієнт потужності, активну, реактивну та повну потужності котушки.

Задача 8. До джерела з напругою $U = 250$ В та частотою $f = 50$ Гц підключені послідовно реостат R з активним опором $R = 40$ Ом і конденсатор C з ємністю $C = 106,16$ мкФ.

Обчислити струм в колі, спад напруги на активному опорі та на конденсаторі, коефіцієнт потужності, активну, реактивну і повну потужності кола.

Задача 9. До джерела з напругою $U = U_M \sin \omega t$, діюче значення якої 120 В і частота $f = 50$ Гц, підключена котушка з активним опором $R = 40$ Ом та коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,8$.

Знайти струм у котушці, активну та індуктивну складові напруги, активну, реактивну і повну потужності, що поглинаються котушкою. Написати рівняння миттєвих значень струму та побудувати трикутник потужностей.

Задача 10. Котушкою з активним опором $R = 15,2$ Ом та індуктивністю $L = 41,4$ мГн протікає струм, миттєве значення якого $i = 15,5 \sin 314 t$ А.

Визначити діюче значення і написати рівняння напруги, прикладеної до затискачів котушки. Знайти активну, реактивну та повну потужності кола. Побудувати трикутник опорів.

Задача 11. Електричним колом, яке складається з реостата з $R = 24$ Ом та конденсатора з $C = 99,5$ мкФ, протікає струм $i = 7,05 \sin 314 t$ А.

Обчислити діюче значення і написати рівняння напруги, прикладеної до затискачів кола. Знайти активну, реактивну та повну потужності кола.

Побудувати трикутник опорів.

Задача 12. До затискачів котушки з активним опором R та індуктивністю L прикладена напруга в $U=141 \sin(314t+60^\circ)$ В. По котушці протікає струм $i=14,1 \sin 314t$ А.

Визначити параметри котушки, активну і реактивну складові напруги, активну, реактивну та повну потужності котушки. Побудувати векторну діаграму.

Задача 13. До затискачів електричного кола, яке складається з реостата і конденсатора, прикладена напруга $U=112,8 \sin(314t+36^\circ 50')$ В. По котушці проходить струм $i=5,64 \sin 314t$ А.

Знайти опір реостата, ємність конденсатора, коефіцієнт потужності, напруги на реостаті і на конденсаторі, активну, реактивну та повну потужності кола. Побудувати трикутник напруг.

Задача 14. До джерела змінного струму з напругою U підключені послідовно три приймачі (рис. 4.19).

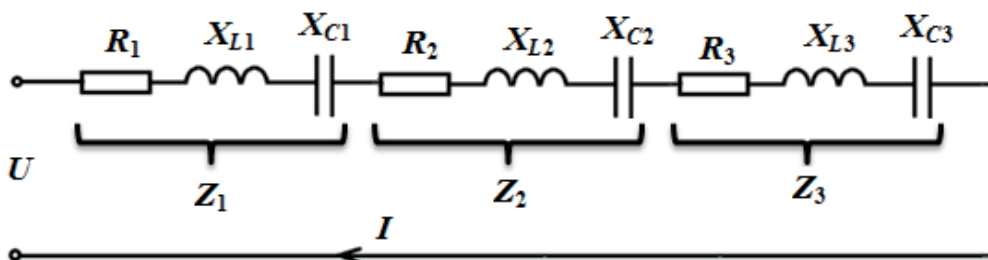


Рис. 4.19

Визначити: струм в колі I ; спад напруги на кожному з приймачів U_1, U_2, U_3 ; коефіцієнт потужності кола $\cos \varphi$; активну P_k , реактивну Q_k і повну S_k потужності кожного приймача та всього кола (побудувати векторну діаграму напруг і струму) [47].

Варіанти завдань до задачі 14

№ варіанту	U , В	R_1 , Ом	X_{L1} , Ом	X_{C1} , Ом	R_2 , Ом	X_{L2} , Ом	X_{C2} , Ом	R_3 , Ом	X_{L3} , Ом	X_{C3} , Ом
1	100	–	10	–	3	4	–	1	–	11
2	50	–	4	–	2	2	12	1	2	–
3	100	3	–	4	–	10	10	1	2	–
4	63,2	2	14	–	2	–	10	1	–	19
5	79	10	–	10	–	20	–	5	5	30
6	126,4	2	10	–	2	–	14	1	19	–
7	158	–	–	20	10	10	–	5	30	5
8	200	6	8	–	6	18	–	–	–	10
9	100	4	3	–	4	15	–	8	–	6
10	200	6	–	18	6	8	–	–	–	6
11	100	4	–	15	4	–	3	8	6	–
12	100	6,2	25	5	5	5	–	4	–	12
13	200	–	6,2	–	5	–	11	8	20	–
14	200	5	–	5	6,2	25	4	4	16	19
15	100	5	11	–	–	–	6,2	8	–	20
16	150	8	6	–	5	21	–	5	–	3
17	120	12	24	–	6	–	12	6	6	–
18	60	8	–	6	5	3	–	5	–	21
19	150	12	–	12	–	24	–	12	–	30
20	130	6	10	–	–	10	–	6	–	15
21	65	–	10	5	5	15	–	–	–	8
22	65	–	–	10	6	–	10	6	15	–
23	10	5	–	15	4	5	10	6	–	–
24	400	16	12	–	–	18	–	16	4	10
25	200	6	16	–	12	20	–	6	–	4
26	80	16	–	16	–	12	–	16	4	24
27	220	–	3	–	4	10	10	–	1	1
28	250	10	2	–	–	2	14	1	–	19
29	100	2	12	2	–	–	4	1	–	2
30	100	–	10	–	3	4	–	1	–	11

Задача 15. До джерела змінного струму з $U = 120$ В підключені послідовно реостат з активним опором $R = 8$ Ом і конденсатор з ємністю $C = 530$ мкФ.

Обчислити струм у колі, коефіцієнт потужності, активну, реактивну та повну потужності для частот $f_1 = 50$ Гц і $f_2 = 100$ Гц.

Задача 16. У мережу з напругою $U = 220$ В і частотою $f = 50$ Гц включені послідовно активний опір $R = 11$ Ом, індуктивність $L = 159,2$ мГн та змінна ємність C .

Обчислити величину ємності C_0 , при якій настане резонанс напруг. Розрахувати коло в режимі резонансу напруг і побудувати трикутник потужностей.

Задача 17. До джерела змінного струму $U = 220$ В підключені послідовно реостат з опором $R = 10$ Ом, котушка з індуктивністю $L = 0,318$ Гн і конденсатор з ємністю $C = 53,1$ мкФ.

Знайти частоту f_0 , при якій в колі настане резонанс напруг. Розрахувати коло в режимі резонансу напруг і побудувати векторну діаграму.

Задача 18. До трифазного джерела з $U_{\text{л}} = 400$ В підключені три однакових приймачі, з'єднані зіркою, і мають опори $R = 5$ Ом та $X_L = 15$ Ом.

Визначити фазні та лінійні струми, потужності трифазного кола. Побудувати топографічну діаграму.

Задача 19. До трифазної мережі з $U_{\text{л}} = 380$ В підключений трифазний асинхронний двигун з номінальною активною потужністю (на валу) $P_{\text{ном}} = 14$ кВт, коефіцієнтом потужності $\cos\varphi = 0,89$ і коефіцієнтом корисної дії $\eta = 90\%$. Обмотки двигуна з'єднані зіркою.

Обчислити струми в фазах двигуна, параметри обмоток фаз. Побудувати топографічну діаграму.

Задача 20. До джерела змінного струму з напругою U паралельно підключені два приймачі. Перший з них має параметри R_1, X_{L1}, X_{C1} другий – R_2, X_{L2}, X_{C2} (рис. 4.20).

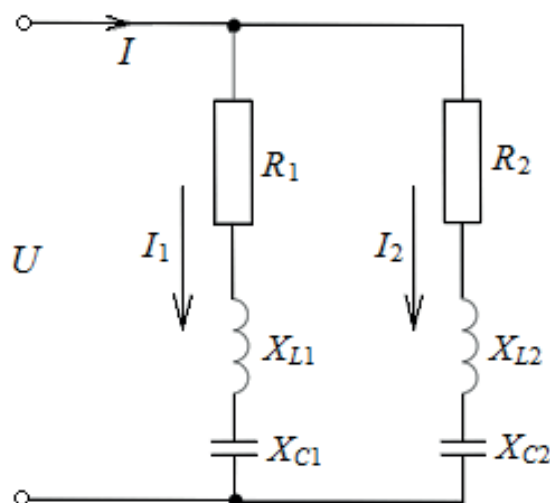


Рис. 4.20.

Визначити: струми I_1 , I_2 у вітках кола та I в нерозгалуженій частині методом провідностей; коефіцієнти потужності $\cos\varphi_1$, $\cos\varphi_2$, $\cos\varphi_3$; активну P , реактивну Q і повну S потужності приймачів і всього кола. Побудувати векторну діаграму [48].

Таблиця 4.2.

Варіанти завдань до задачі 20

№ варіанту	U , В	R_1 , Ом	X_1 , Ом	Характер навантаження	R_2 , Ом	X_2 , Ом	Характер навантаження
1	28,2	6	8	R_1L	2	2	R_2C
2	135	8	6	R_1L	12	16	R_2L
3	73,5	8	6	R_1L	–	20	L

4	108,2	4	8	R_1C	10	20	R_2L
5	40,5	8	6	R_1C	4	3	R_2L
6	139	20	10	R_1L	–	25	L
7	89,3	6	8	R_1L	16	12	R_2C
8	206,6	30	40	R_1C	12	16	R_2L
9	124	10	10	R_1C	12	16	R_2L
10	112	–	10	L	8	6	R_2C
11	89,3	12	16	R_1L	8	6	R_2C
12	105	4	4	R_1L	6	8	R_1C
13	89,3	8	6	R_1C	12	6	R_2C
14	67,2	6	8	R_1L	16	12	R_2L
15	108,5	10	10	R_1C	16	12	R_2L
16	45,3	6	8	R_1C	2	2	R_2L
17	45,3	8	6	R_1L	2	2	R_2L
18	70	12	16	R_1L	–	10	L
19	70	12	16	R_1C	–	10	C
20	70	12	6	R_1C	–	10	L
21	70	12	16	R_1C	–	10	C
22	125	30	40	R_1C	12	20	R_2L
23	140	20	10	R_1L	–	25	L
24	140	20	10	R_1L	6	8	R_2C
25	48,5	16	12	R_1L	3	4	R_2C
26	100	6	8	R_1L	8	6	R_2C
27	127	10	40	R_1C	4	3	R_2L
28	220	20	10	R_1C	12	16	R_2C
29	50	8	6	R_1C	20	10	R_2C
30	80	4	4	R_1L	6	8	R_2C

Задача 21. У трифазну мережу з $U_n = 220$ В включений трифазний синхронний двигун, обмотки якого з'єднані зіркою. Покази амперметра в лінійному проводі $I_n = 29,8$ А, $\cos\varphi = 0,88$. Знайти фазну напругу, параметри обмоток фаз двигуна, активну, реактивну та повну потужності асинхронного двигуна. Побудувати топографічну діаграму.

Задача 22. До трифазної мережі з $U_n = 660$ В підключені три однакових приймача енергії, з'єднані трикутником і мають опори $R = 32$ Ом та $X_L = 24$ Ом.

Визначити фазні та лінійні струми, потужності трифазного кола. Побудувати топографічну діаграму.

Задача 23. У трифазну мережу з напругою U включені три однакових приймачі енергії (рис. 4.21). Опори приймачів R , X_L , X_C (табл. 4.3) [46].

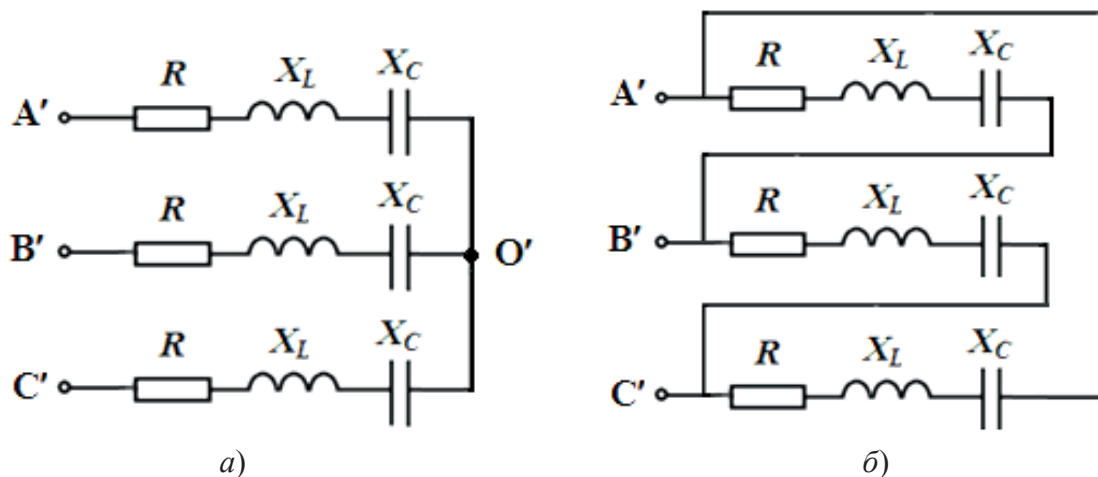


Рис. 4.21. Електрична схема

Визначити:

1. Фазні та лінійні струми.
2. Коефіцієнт потужності, активні і реактивні потужності всього кола та кожної фази окремо.
3. Побудувати топографічні діаграми.

Завдання вирішити для випадків, коли приймачі енергії з'єднані зіркою (рис. 4.21, а), а потім трикутником (рис. 4.21, б).

Порівняти отримані результати.

Таблиця 4.3.

Варіанти завдань до задачі 18

№ варіанту	U , В	R_{ϕ} , Ом	$X_{L\phi}$, Ом	$X_{C\phi}$, Ом
1	86,5	3	4	–
2	173	4	–	3
3	380	12	16	–
4	380	13	–	12
5	400	32	16	–
6	600	32	–	16
7	225	5	12	–
8	450	5	–	12
9	244	2	14	–
10	380	14	–	2
11	400	5	15	–
12	230	15	–	5

13	380	15,2	–	13
14	660	13	15,2	–
15	520	18	24	–
16	660	24	–	18
17	277	9,6	12,8	–
18	380	12,8	–	9,6
19	660	15	20	–
20	600	20	–	15
21	3000	45	60	–
22	3300	60	–	45
23	216,5	7,5	10	–
24	220	10	–	7,5
25	380	10	20	–
26	500	20	–	10
27	660	9	12	–
28	380	12	–	9
29	230	16	–	12
30	400	14	2	–

Задача 24. До трифазної мережі з $U_n = 380$ В підключений трифазний асинхронний двигун з номінальною активною потужністю (на валу) $P_{\text{ном}} = 14$ кВт; $\cos\varphi = 0,89$ і ККД $\eta = 90\%$. Обмотки двигуна з'єднані трикутником. Знайти струми в обмотках фаз двигуна, струми в підвідних проводах, параметри обмоток двигуна. Побудувати топографічну діаграму.

Задача 25. Коефіцієнт трансформації трансформатора дорівнює 20. Напряга на первинній обмотці 120 В. Визначити напрягу на вторинній обмотці та число витків у ній, якщо первинна обмотка має 200 витків.

Задача 26. Трансформатор, який має у первинній обмотці 840 витків, підвищує напрягу з 220 В до 660 В. Визначити коефіцієнт трансформації та

кількість витків у вторинній обмотці трансформатора? В якій обмотці провід матиме більшу площу перетину?

Задача 27. Для визначення кількості витків у первинній та вторинній обмотках трансформатора на його вторинну котушку намотали 10 витків проводу. При підключенні первинної обмотки до мережі напругою 220 В, вольтметр показав спад напруги на обмотці з 10 витками 4,2 В, а на вторинній обмотці – 14 В. Скільки витків в обидвох обмотках?

Задача 28. Трансформатором споживає потужність 90 Вт. Визначити силу струму у вторинній обмотці, якщо спад напруги на контактах вторинної обмотки 12 В і ККД трансформатора 75%.

Задача 29. Первинна обмотка понижувального трансформатора включена в мережу напругою 220 В. Спад напруги на контактах вторинної обмотки 20 В, її опір 1 Ом, а сила струму 2 А. Визначити ККД трансформатора та коефіцієнт трансформації.

Задача 30. Максимальний магнітний потік в осерді однофазного трансформатора становить 0,005 Вб. При холостому ході спад напруги на вторинній обмотці становить 120 В. Кількість витків у первинній обмотці $\omega_1 = 500$. Частота мережі 50 Гц. знайти коефіцієнт трансформації та напругу мережі живлення.

Задача 31. Трансформатор потужністю 60 кВА має втрати в сталі 400 Вт та втрати в обмотках при повному навантаженні (100%) 1350 Вт. Визначити ККД при навантаженнях 100%, 75%, 50%, та 25% номінальної, вважаючи навантаження чисто активним ($\cos\varphi = 1$).

Задача 32. На яку силу струму повинен бути розрахований провід первинної обмотки автотрансформатора, якщо у вторинній обмотці максимальне значення сили струму 100 А при напрузі 40 В? Напруга на первинній обмотці трансформатора 380 В. Втратами потужності знехтувати.

Задача 33. Вторинна обмотка трансформатора, яка має 95 витків, пронизується магнітним потоком, що змінюється з часом через один виток за законом $\Phi = 0,01 \sin 100 \pi t$. Написати формулу, яка виражає залежність ЕРС у вторинній обмотці від часу.

Задача 34. Номінальне значення первинної та вторинної напруги однофазного трансформатора $U_{1ном} = 110$ кВ і $U_{2ном} = 6,3$ кВ, номінальний

первинний струм $I_{1ном} = 95,5$ А. Визначити номінальну потужність трансформатора та номінальний вторинний струм.

Задача 35. В однофазному трансформаторі номінальною потужністю $S_{ном} = 100$ кВА, номінальними напругами $U_{1ном} = 6$ кВ та $U_{2ном} = 0,4$ кВ, максимальне значення магнітної індукції в стрижні $B_{max} = 1,4$ Тл, ЕРС одного витка $E_{вит} = 5$ В. Частота змінного струму мережі $f = 50$ Гц, коефіцієнт заповнення стрижня сталлю $k_{ст} = 0,93$. Визначити число витків в обмотках, номінальні значення струмів в обмотках, площу поперечного перерізу.

Задача 36. Параметри трифазного трансформатора такі: номінальна потужність $S_{ном} = 25$ кВА, номінальна змінна напруги $U_{1ном} = 10$ кВ, струм холостого ходу $i_0 = 3,2$, напруга короткого замикання $u_k = 4,5$, потужність холостого ходу $P_0 = 0,13$ кВт та короткого замикання $P_k = 0,6$ кВт. Схема з'єднання обмоток трансформатора – Y/Y. Частота змінного струму в мережі $f = 50$ Гц. Визначити опір короткого замикання, його активну та реактивну складові; параметри намагнічуючого контуру.

Задача 37. Трифазний трансформатора має такі параметри: номінальну вторинну напругу $U_{2ном} = 0,4$ кВ, напругу короткого замикання $u_k = 6,5$, коефіцієнт потужності короткого замикання $\cos \phi_k = 0,31$; коефіцієнт потужності навантаження $\cos \phi_2 = 0,8$ (характер навантаження ємнісний). Схема з'єднання обмоток трансформатора – Y/Y. Частота змінного струму в мережі $f = 50$ Гц. Визначити номінальну зміну вторинної напруги (%) та значення вторинної напруги (В) при номінальному ємнісному навантаженні.

Задача 38. Задана повна номінальна потужність трифазного трансформатора $S_{ном} = 100$ кВА, номінальні потужності холостого ходу $P_0 = 0,465$ кВт та короткого замикання $P_k = 1,97$ кВт, коефіцієнт потужності навантаження $\cos \phi_2 = 0,8$. Схема з'єднання обмоток трансформатора – Y/Y. Частота змінного струму в мережі $f = 50$ Гц. Визначити коефіцієнт корисної дії при номінальному навантаженні та максимальний ККД.

Задача 39. Трифазний трансформатор має такі параметри: номінальну потужність $S_{ном}$; номінальну первинну $U_{1ном}$ та вторинну напругу $U_{2ном}$; номінальний струм у вторинному колі $I_{2ном}$; коефіцієнт трансформації k ; кількість витків в обмотках w_1 та w_2 ; максимальне значення магнітної індукції B_{max} ; максимальне значення основного магнітного потоку Φ_{max} ; площу поперечного перерізу стрижня $Q_{ст}$; ЕРС одного витка $E_{вит}$.

Визначити параметри трансформатора, які не вказані в табл. 4.4 [49].

Зауваження:

1. Схема з'єднання обмоток трансформатора – Y/Y.
2. Частота змінного струму в мережі $f = 50$ Гц.
3. Коефіцієнт заповнення стрижня сталлю $k_{ст} = 0,93$.
4. Число витків в обмотках трансформатора заокруглити до цілого.
5. Вихідні дані та результати розрахунку представити у вигляді таблиці.

Таблиця 4.4.

Параметри трансформатора

№	$S_{ном}$, кВА	$U_{1ном}$, кВ	$U_{2ном}$, кВ	$I_{2ном}$, А	k	w_1 , ВИТ.	w_2 , ВИТ.	B_{max} , Тл	Φ_{max} , Вб	$Q_{ст}$, м ²	$E_{аум}$, В
1	25	—	0,23	—	—	2136	—	1,58	—	0,0087	—
2	63	6	0,4	—	—	—	78	1,58	—	—	—
3	160	6	—	—	8,696	696	—	1,62	—	—	—
4	400	—	0,4	—	15	—	33	—	—	0,0361	—
5	—	—	0,4	360,9	87,5	—	—	1,58	—	—	11,18
6	1000	20	0,69	—	—	—	—	1,59	—	0,0661	—
7	2500	20	0,69	—	—	522	—	—	—	0,1124	—
8	250	—	—	361	25	—	36	1,55	—	—	6,3
9	—	6	—	837	—	—	31	1,58	—	0,0659	—
10	25	6	0,4	—	—	—	116	1,55	—	—	—
11	63	10	—	—	43,47	1826	—	1,6	—	—	—
12	160	—	0,69	—	29	—	81	—	—	0,0225	—
13	—	6	—	733	1,9	118	—	1,55	—	—	—
14	400	10	0,23	—	—	—	—	1,55	—	—	14,32
15	1000	10	0,69	—	—	449	—	1,57	—	—	—
16	2500	—	3,15	—	3,2	—	85	1,56	—	—	—
17	—	—	—	627,5	152	—	28	1,62	—	0,0235	—
18	63	20	0,4	—	—	3600	—	1,58	—	—	—
19	160	10	0,4	—	—	—	48	1,57	—	—	—
20	1000	20	—	836	—	870	—	1,55	—	—	6,28
21	2500	35	—	—	5,55	944	—	1,6	—	—	—
22	4000	35	—	—	11,11	778	—	—	—	0,129	—
23	25	10	0,23	—	—	—	—	1,59	—	—	3,14
24	63	—	0,4	—	15	1170	—	1,55	—	—	—
25	160	35	0,69	—	—	—	—	1,62	—	0,0243	—

Задача 40. Трифазний трансформатор має: номінальну потужність $S_{ном}$; номінальну первинну напругу $U_{1ном}$; номінальну вторинну напругу $U_{2ном}$; номінальний струм первинного кола $I_{1ном}$; напругу короткого замикання U_k , u_k , його активна $u_{k.a}$ та реактивна $u_{k.p}$ складові; опір короткого замикання Z_k , його активна r_k та реактивна x_k складові; струм холостого ходу I_0 , $i_0\%$; потужності короткого замикання P_k та холостого ходу P_0 ; коефіцієнт потужності короткого замикання $\cos\phi_k$ та холостого ходу $\cos\phi_0$; номінальну зміну напруги при скиданні навантаження $\Delta U_{ном}$; коефіцієнт потужності

навантаження $\cos \phi_2$ (характер навантаження); коефіцієнт корисної дії η при номінальному навантаженні ($\beta = 1$) та максимальний ККД η_{\max} .

Визначити, для вибраного варіанту, значення параметрів, які не вказані в табл. 4.5 та табл. 4.6 [49].

Представити зовнішню характеристику трансформатора $U_2 = f(\beta)$ при номінальному навантаженні ($\beta = 1$).

Зауваження:

1. Схема з'єднання обмоток трансформатора – Y/Y.
2. Частота змінного струму в мережі $f = 50$ Гц.
3. Вихідні дані та результати розрахунку представити у вигляді таблиці.

Таблиця 4.5.

Параметри трансформатора

№	$S_{\text{ном}}$, кВА	$U_{1\text{ном}}$, кВ	$U_{2\text{ном}}$, кВ	$I_{1\text{ном}}$, А	P_0 , кВт	I_0 , А	i_0 , %	$\cos \phi_0$	P_k , кВт	U_k , В
1	25	10	0,4	–	0,3	–	3,2	–	0,6	–
2	–	6	0,4	3,87	0,175	0,115	–	–	0,88	280
3	62	10	0,4	–	–	0,10	–	0,15	–	450
4	–	6	0,4	9,6	–	–	2,6	0,13	–	–
5	–	10	0,525	9,2	0,51	–	2,4	–	2,65	–
6	2500	–	0,69	144	–	–	1	0,13	–	–
7	160	–	0,525	9,2	0,46	–	2,4	–	2,65	–
8	–	10	0,69	2,3	0,15	0,072	–	–	0,88	475
9	63	3	0,69	–	–	0,35	–	0,1	–	153
10	–	20	0,69	2,9	–	–	2,8	0,3	–	–
11	–	20	0,4	4,6	0,46	–	2,4	–	2,65	–
12	2500	–	6,3	72,2	–	–	1,3	0,136	–	–
13	4000	35	11	–	5,4	–	1	–	33	–
14	–	20	0,4	1,819	–	–	2,9	0,119	–	–
15	–	3	0,525	4,8	0,105	–	3,2	–	0,6	165
16	40	10	0,525	–	–	–	3	0,125	–	–
17	63	3	0,69	–	0,22	–	2,8	–	1,28	–
18	100	20	0,69	–	–	0,075	–	0,15	–	935
19	100	35	11	–	2,1	–	1,4	–	–	–
20	2500	20	6,3	–	3,9	–	1	–	25	–
21	–	35	0,525	6,6	–	–	2,1	0,136	–	–
22	25	3	0,525	–	–	0,151	–	0,15	–	143
23	–	10	0,4	5,8	0,31	–	2,6	–	–	–
24	–	20	0,4	11,55	1,2	0,33	–	–	5,5	951
25	40	3	0,69	–	–	–	3,2	0,125	–	–

Таблиця 4.6.

Параметри трансформатора

№	$\cos \phi_k$	u_k %	$u_{k,a}$ %	$u_{k,p}$ %	Z_k , Ом	r_k , Ом	x_k , Ом	$\cos \phi_2$ Тип наван- таженн я	η , %	η_{max} , %	$\Delta U_{ном}$, %
1	–	4,5	–	–	–	–	–	1 Акт	–	–	–
2	–	–	–	–	–	–	–	1 Акт	–	–	–
3	0,7	4,5	–	–	–	–	–	1 Акт	–	–	–
4	0,3	–	1,95	6,2	–	–	–	1 Акт	–	–	–
5	–	4,5	–	–	–	–	–	1 Акт	–	–	–
6	–	–	–	–	–	0,5	2,6	1 Акт	–	–	–
7	–	5,5	–	–	–	–	–	0,8 Інд	–	–	–
8	–	–	–	–	–	–	–	0,8 Інд	–	–	–
9	0,4	–	–	–	–	–	–	0,8 Інд	–	–	–
10	–	4,5	1,97	–	–	–	–	0,8 Інд	–	–	–
11	–	6,5	–	–	–	–	–	0,8 Інд	–	–	–
12	–	–	–	–	–	1,6	10,3	0,8 Інд	–	–	–
13	–	5,5	–	–	–	–	–	0,8 Ємн	–	–	–
14	0,33	–	2,16	–	–	–	–	0,8 Ємн	–	–	–
15	–	–	–	–	–	–	–	0,8 Ємн	–	–	–
16	–	–	–	–	–	55	137,5	0,8 Ємн	–	–	–
17	–	5,5	–	–	–	–	–	0,8 Ємн	–	–	–
18	–	–	–	–	–	80	–	0,8 Ємн	–	–	–
19	0,22	–	1,2	–	–	–	–	1 Акт	–	–	–
20	–	5,5	–	–	–	–	–	1 Акт	–	–	–
21	–	–	–	–	–	42	194	0,7 Інд	–	–	–
22	–	–	–	–	–	7	–	0,7 Інд	–	–	–
23	–	–	1,97	–	50	–	–	0,7 Ємн	–	–	–
24	–	–	–	–	–	–	–	0,7 Ємн	–	–	–
25	–	–	–	–	–	4,9	13,8	0,7 Інд	–	–	–

Задача 41. Однофазний понижувальний трансформатор номінальної (прохідної) потужності $S_{ном}$ при номінальній змінній напрузі U_1 та номінальній вторинній напрузі U_2 має кількість витків в обмотці w_1 , з яких w_2 є спільними для первинного та вторинного кола; ЕРС, яка індукується в одному витку трансформатора $E_{вит}$. Визначити невідомі в табл. 4.7 параметри [49], а також у скільки разів маса та втрати цього трансформатора менші, ніж у двохобмоткового трансформатора такої ж потужності та напруг; визначити потужності автотрансформатора, які передаються з первинного у вторинне коло електричним та електромагнітним шляхами. Струмом холостого ходу знехтувати.

Таблиця 4.7.

Параметри трансформатора

Параметр	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{ном}$, кВА	15	4,0	6,0	16	8,0	3,0	5,0	2,8	9,0	12
U_1 , В	220	–	380	–	220	–	220	–	380	–
U_2 , В	–	110	–	220	–	127	–	140	–	220
$E_{вит}$, В	0,85	0,75	1,73	0,90	0,90	0,85	1,0	0,85	1,0	1,022
w_1 , ВИТ.	–	–	–	–	–	250	250	270	400	400
w_2 , ВИТ.	130	130	250	240	130	–	–	–	–	–

Задача 42. У табл. 4.8 вказано значення таких параметрів понижувального автотрансформатора: номінальна (прохідна) потужність $S_{ном}$, коефіцієнт трансформації k_A , струми у первинному $I_{1ном}$ та вторинному $I_{2ном}$ колах, струм у спільній частині витків I_{12} , первинна U_1 та вторинна U_2 напруги, потужність розрахункова $S_{розр}$ та передана електричним шляхом S_e . Використовуючи вказані в таблиці параметри визначити невідомі величини.

Таблиця 4.8.

Параметри трансформатора

Параметр	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{ном}$, кВА	2,64	–	–	2,2	–	3,5	–	3,5	–	2,8
S_e , кВА	–	–	1,3	0,85	–	–	0,65	–	–	–
$S_{розр}$, кВА	–	–	0,5	–	0,8	–	–	–	1,1	–
U_1 , В	–	220	380	–	–	380	–	380	–	–
U_2 , В	127	–	–	250	–	–	300	–	220	–
$I_{1ном}$, А	12	8	–	–	–	–	–	–	–	12,7
$I_{2ном}$, А	–	–	–	–	–	12	–	11	15	–
$I_{12ном}$, А	–	–	–	–	6	–	–	–	–	–
k_A	–	1,35	–	–	1,25	–	1,30	–	–	1,80

Задача 43. Для однофазного трансформатора номінальною потужністю $S_{ном}$ та номінальною первинною напругою $U_{1ном}$, потужність короткого замикання $P_{к.ном}$ і напруга короткого замикання u_k розрахувати параметри та побудувати графік залежності зміни вторинної напруги ΔU від коефіцієнта навантаження β , якщо коефіцієнт потужності навантаження $\cos\varphi_2$. Вихідні дані приведені в табл. 4.9.

Таблиця 4.9.

Параметри трансформатора

Параметр	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{ном}$, кВА	600	250	800	100	180	560	320	50	120	80
$U_{1ном}$, кВ	31,5	6,3	31,5	6,3	6,3	10	10	3,4	6,3	10
$P_{к.ном}$, кВт	20	12	22	7	10	25	13	3,5	8	5,4
u_k , %	8,5	6,5	8,5	5,5	6,5	7	6,5	5,5	5,5	6
$\cos\varphi_2$	0,75	0,85	0,80	0,70	1,0	0,85	0,9	1,0	0,80	0,70

	(ємн.)	(інд.)	(ємн.)	(інд.)		(інд.)	(ємн.)		(інд.)	(інд.)
--	--------	--------	--------	--------	--	--------	--------	--	--------	--------

Задача 44. У табл. 4.10 приведено дані трифазних силових трансформаторів серії ТМ [49]: повна номінальна потужність $S_{ном}$; номінальні втрати холостого ходу $P_{0,ном}$ і короткого замикання $P_{к,ном}$; коефіцієнт потужності навантаження $\cos \phi_2$. Визначити величину зменшення ККД при номінальному навантаженні в порівнянні з його максимальним значенням.

Таблиця 4.10.

Параметри трансформатора

Тип трансформатора	$S_{ном}$, кВА	$P_{0,ном}$, кВт	$P_{к,ном}$, кВт	$\cos \phi_2$
ТМ-100/35	100	0,465	1,97	0,80
ТМ-160/35	160	0,70	2,65	0,85
ТМ-250/35	250	1,0	3,70	0,85
ТМ-400/35	400	1,35	5,50	0,80
ТМ-630/35	630	1,90	7,60	0,75
ТМ-1000/35	1000	2,75	12,2	0,70
ТМ-1600/35	1600	3,65	18,0	0,80
ТМ-2500/35	2500	5,10	25,0	0,75
ТМ-4000/35	4000	6,70	33,5	0,85
ТМ-6300/35	6300	9,40	46,5	0,80

Задача 45. У табл. 4.11 приведені технічні дані трифазних трансформаторів серії ТСЗ (трансформатор трифазний сухий із заземленою первинною обмоткою) [49]. Використовуючи ці дані, визначити: коефіцієнт трансформації k ; номінальні значення струмів первинної $I_{1ном}$ та вторинної $I_{2ном}$ обмоток; струм холостого ходу $I_{0ном}$; напругу короткого замикання $U_{к,ном}$; опір короткого замикання Z_k і його активну r_k та індуктивну складові x_k ; визначити номінальну зміну напруги при значеннях коефіцієнта потужності навантаження $\cos \phi_2 = 1; 0,8$ (інд.) та $0,8$ (ємн.); номінальні та максимальні значення ККД трансформатора при коефіцієнтах потужності $\cos \phi_2 = 1$ і $0,8$.

Таблиця 4.11.

Параметри трансформатора

Тип трансформатора	$S_{ном}$, кВА	$U_{1ном}$, В	$U_{2ном}$, В	P_0 , кВт	$P_{к,ном}$, кВт	u_k , %	I_0 , %
ТСЗ-160/6	160	6	0,23	0,7	2,7	5,5	4,0

ТСЗ-160/10	160	10	0,4	0,7	2,7	5,5	4,0
ТСЗ-250/6	250	6	0,23	1,0	3,8	5,5	3,2
ТСЗ-250/10	250	10	0,4	1,0	3,8	5,5	3,5
ТСЗ-400/6	400	6	0,23	1,3	5,4	5,5	3,0
ТСЗ-400/10	400	10	0,4	1,3	5,1	5,5	3,0
ТСЗ-630/6	630	6	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5
ТСЗ-630/10	630	10	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5
ТСЗ-1000/6	1000	6	0,4	3,0	11,3	5,5	1,5
ТСЗ-1000/10	1000	10	0,4	3,0	11,3	5,5	1,5
ТСЗ-1600/10	1600	10	0,4	4,2	16,0	5,5	1,5

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: Афіша, 2001. 424 с.
2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка: підручник. Львів: видавництво «Бескид Біт», 2003. 640 с.
3. Марилов Н.Г. Электротехнические цепи однофазного синусоидального тока : учеб. пособие. Краматорск: ДГМА, 2005. 291 с.
4. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: учебник для неэлектротехн. спец. вузов. Москва: Академия, 2008. 538 с.
5. Электротехника: учебное пособие для вузов / Ю.М. Борисов и др. Минск: Высшая школа, 2008. 543 с.
6. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: електричні кола: навчальний посібник для студентів неелектротехнічних спеціальностей усіх форм навчання / О.В. Колот та ін. Краматорськ: ДДМА, 2012. 124 с.
7. Шегедин, О.І., Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1. Львів: Магнолія плюс, 2004. 168 с.
8. Форкун Я.Б., Глебова М.Л., Сабалаєва Н.О. Конспект лекцій з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина II. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. 105 с.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. Москва: Гардарики, 2002. 640 с.
10. Основы теории цепей: Учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, Н.Н. Нетушил, П.И. Страхов. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
11. Электротехника: учебник для неэлектротехнических специальностей вузов / Под редакцией В.Г. Герасимова. Москва: Высшая школа, 1985. 480 с.
12. Касаткин А.С. Немцов М.В. Электротехника. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 440 с.
13. Электротехника / под ред. В. Г. Герасимова. Москва: Высш. шк., 1983.

480 с.

14. Иванов И.И., Равдоник В.С. Электротехника: учебник для вузов. Москва: Высш. шк., 1984. 375 с.

15. Аполлонский С.М., Леонтьев В.В. Электротехника и электроника. Трехфазные электрические цепи: Учебн. Пособие. Санкт-Петербург: СЗТУ, 2002. 59 с.

16. Проскуряков В.С., Соболев С.В., Хрулькова Н.В. Электротехника: Трехфазные электрические цепи. Учебное пособие. Екатеринбург: 2007. 24 с.

17. Астапенко Э.С. Электротехника. Однофазные и трехфазные цепи переменного тока. Учебное пособие. Томск: ТГАСУ, 2016. 65 с.

18. Ашанин В.Н., Регеда О.Н. Трехфазные цепи: учеб. пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. 52 с.

19. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 124 с.

20. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. 4-е изд. Санкт-Петербург: Питер, 2006. 386 с.

21. Матвійчук А.Я., Стінянський В.Л. Електротехніка: навчально-методичний посібник. Вінниця: видавництво Вінницького державного педагогічного університету ім. М. Коцюбинського, 2017. 270 с.

22. Трансформаторы в истории человечества. URL: <https://library.e.abb.com/public/abb28ebfa050e89ac12573b400458a94/p80-86.pdf>

23. Трансформаторы тока / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель и др. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. 416 с.

24. Мартынов А.А. Трансформатор для вторичных источников питания. Учебн. пособие. Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2001. 50 с.

25. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2009. 301 с.

26. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Львів: Афіша, 2001. 424 с.

27. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 264 с.

28. Дымков А.М. Расчет и конструирование трансформаторов. Учебник для техникумов. Москва: Высшая школа, 1971. 326 с.

29. Расчет трансформатора. URL: <https://www.radiokot.ru/konkursCatDay2014/05/01.pdf>

30. Черкашин Ю. Расчет трансформаторов при произвольных изменениях напряжений и токов. Силовая Электроника. 2009. № 2. С. 26-30.

31. Чунихин А.А., Жаворонкин Н.А. Аппараты высокого напряжения:

учебное пособие для ВУЗов. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.

32. Электротехнические аппараты высокого напряжения: учебник для ВУЗов / под ред. Г.Н. Александрова. 2-е изд., доп. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2000. 540 с.

33. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицкий С.М. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2008. 219 с.

34. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 428 с.

35. Черкашин Ю.С. Расчет дросселей с магнитопроводом при произвольной форме тока // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 36-42.

36. Сергеевков Б.Н. Электрические машины. Трансформаторы. Москва: Высшая школа, 1959. 428 с.

37. Токарев Б. Ф. Электрические машины: Учеб. пособие для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 624 с.

38. Трехфазные трансформаторы. URL:
<https://studfiles.net/preview/1018630/page:21/>

39. Яцун М.А. Електричні машини: Навч. посібник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. 440 с.

40. Кацман М. М. Электрические машины. 3-е изд., испр. Москва: Высшая школа; Изд. центр "Академия", 2001. 461 с.

41. Імпульсний трансформатор. URL:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/Трансформатор>

42. Клаус Б., Гугенбах П. Прорыв в области измерения сильных постоянных токов. АББ Ревю. 2005. № 1. С. 6-10.

43. Blake J., Williams W., Glasov C., Bergh.R., Fetting K., Hadley E., and Sanders G. "Optical Current Transducers for High Voltage Applications", 2nd EPRI Optical Sensors Systems Vorkshop, Atlanta, Jan. 2000.

44. Interferometric Fiber-Optic Electric Current Sensor for Industrial Application. Starostin N.I., Ryabko M.V., Chamorovskii Yu.K., et all. Key Engineering Materials. 2010. Vol. 437. P. 314-318.

45. Рекус Г.Г., Белоусов А.И. Сборник задач по электротехнике и электронике: учебное пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 1991. 416 с.

46. Сборник задач по электротехнике и электронике: учеб. пособие для вузов / под ред. В.Г. Герасимова. Москва: Высшая школа, 1987. 288 с.

47. Афонин В.В., Акулинин И.Н., Ткаченко А.А. Сборник задач по электротехнике: Учеб. пособие. В 3-х ч. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та,

2004. 364 с.

48. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / Под ред. Л.А. Бессонова. Москва: Высшая школа, 1980. 472 с.

49. Электрические машины: учебно-методическое пособие для выполнения практических работ / сост. Е.С. Молошная. Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2016. 105 с.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- Автотрансформатор, 63
Активна потужність, 18
Активний опір, 18
Амплітудне значення, 10
- Векторна діаграма, 13
Вимірювальний трансформатор, 67
- Груповий трансформатор, 61
- Діюче значення, 10
- Ємнісний реактивний опір, 23
Ємність конденсатора, 23
- З'єднання зіркою, 38
З'єднання трикутником, 38
Змінний струм, 7
Зсув фаз, 12
- Ідеалізований трансформатор, 50
Імпульсний трансформатор, 63
Індуктивний опір, 20
Індуктивність котушки, 19
Індукція магнітного поля, 9
- Коефіцієнта навантаження трансформатора, 58
Коефіцієнт трансформації, 50
Коефіцієнт потужності, 34
Кутова частота, 9
- Миттєве значення, 10
- Опір резистора, 18
Оптико-електронний трансформатор, 69
- Період, 7
Повна потужність, 33
Повний опір, 27
Потужність, 32
- Реактивна потужність, 33
Реактивний опір кола, 27
Реальний трансформатор, 53
Режиму короткого замикання трансформатора, 57
Режим холостого ходу трансформатора, 56
Резонанс напруг, 28
Резонанс струмів, 30
Резонансний режим, 28
- Стрижневий трансформатор, 61
- Трансформатор, 48
Трикутник опорів, 21
Трифазна система, 35
Трифазний генератор, 35
Трифазний трансформатори, 60
- Фаза, 11
- Частота, 7

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

Блаті, 48

Дері, 48

Доліво-Добровольський, 48

Кірхгоф, 39

Ом, 18

Піфагор, 21

Ціперовський, 48

Яблочков, 48

Навчальне видання

Павловський Юрій Вікторович

**Електротехніки та електроніка: розрахунок
електричних кіл змінного струму**

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

Головний редактор
Ірина Невмержицька

Редактор
Іванна Біблій

Технічний редактор
Наталія Кізима

Коректор
Мар'яна Терес

Комп'ютерний набір
Юрій Павловський

Здано до набору 10.02.20. Підписано до друку 17.02.20.
Формат 60×84/16. Папір офсетний. Гарнітура Times. Наклад 100 прим.
Ум. друк. арк. 8,25. Зам. № 12.

Редакційно-видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного
університету імені Івана Франка
(свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виробників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2155
від 12.04.2005 р.)
82100, м. Дрогобич, вул. І.Франка, 24, кім. 43, тел. (0324) 42-23-78