

Електричні кола змінного струму

План лекції

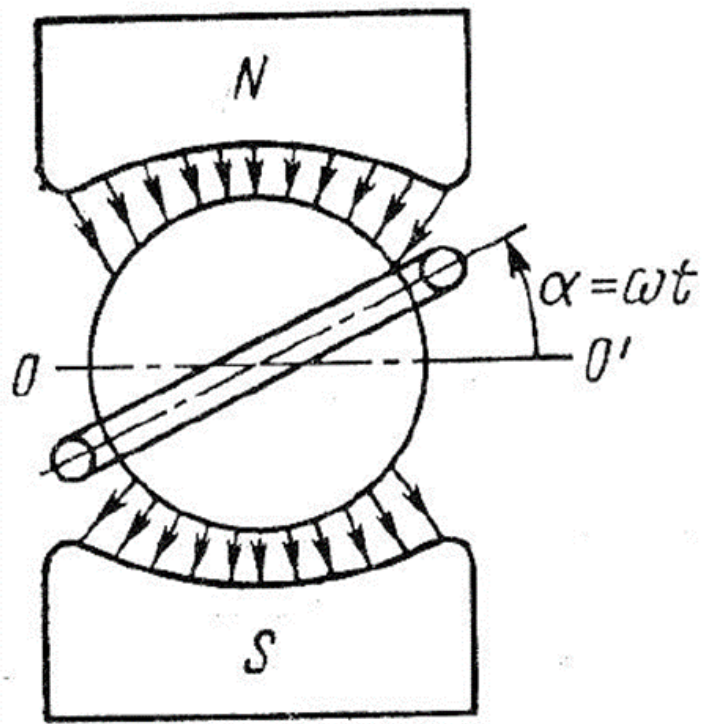
- 1. Основні теоретичні положення.
- 2. Коло змінного струму з індуктивністю.
- 3. Коло змінного струму з резистивним елементом.
- 4. Коло змінного струму з конденсатором.
- 5. Коло змінного струму з індуктивністю.

Основні теоретичні положення

Змінним називають струм, зміна якого за значенням і напрямком повторюється періодично через рівні проміжки часу.

Широке застосування змінного струму в різних областях техніки пояснюється легкістю його одержання й перетворення, а також простотою устрою генераторів і двигунів змінного струму, надійністю їх роботи й зручністю експлуатації.

Розглянемо принцип дії найпростішого генератора змінного струму.



Мал. 1. Модель генератора
змінного струму

Між полюсами електромагніту або постійного магніту (мал. 1) в одноріднім магнітнім полі рівномірно обертається з *кутовою швидкістю* ω рамка площею S .

Магнітний потік через рамку

$$\Phi = BS \cos \alpha \tag{1}$$

де α - кут між нормаллю до рамки й вектором магнітної індукції \vec{B} .

Оскільки при рівномірній обертанні рамки кутова швидкість $\omega = \frac{\alpha}{t}$, то кут α буде змінюватися за законом $\alpha = \omega t$, і формула (1) прийме вигляд

$$\Phi = BS \cos \omega t \quad (2)$$

Величину ω також називають *круговою частотою*.

Через те що при обертанні рамки магнітний потік, що її перетинає, увесь час міняється, то за законом електромагнітної індукції в ній буде ЕРС індукції

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t, \quad (3)$$

де $E_m = BS\omega$ - *амплітуда* (максимальне значення) синусоїдальної ЕДС, що виникає в рамці.

Якщо до затискачів генератора підключити навантаження, то через неї піде струм, який також буде змінюватися за синусоїдальним законом. Графік синусоїдального струму $i = I_m \sin \omega t$ представлений на мал. 2. По осі ординат відкладають струм i , по осі абсцис - кут $\alpha = \omega t$ або час t .

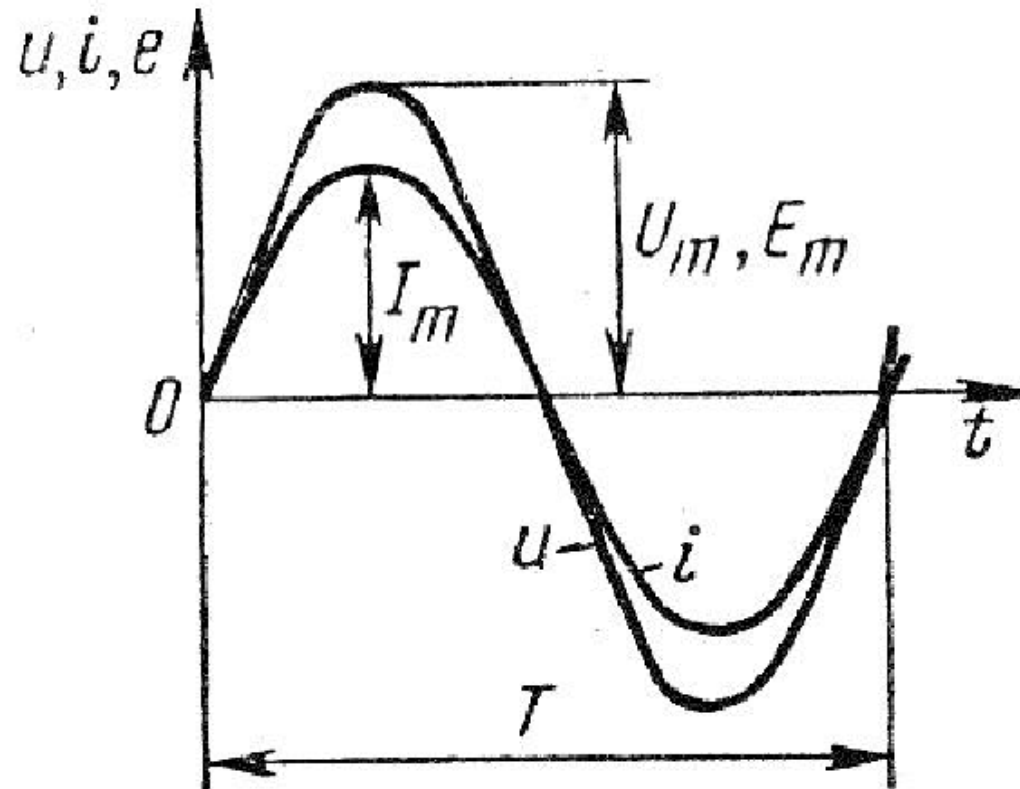
Значення $e = E(t)$ змінної ЕДС (а також струму й напруги) у поточний момент часу називається *миттєвим значенням*.

Величину $\omega t = \frac{2\pi}{T}t = 2\pi ft$, що стоїть під знаком синуса або косинуса, називають *фазою* коливань, описуваних цими функціями. Фаза визначає значення ЕРС у будь-який момент часу t й вимірюється в градусах або радіанах. Величина f називається *частотою* коливань і пов'язана із круговою частотою співвідношенням $\omega = 2\pi f$.

Час T однієї повної зміни ЕРС (час одного оберту рамки) називають *періодом* ЕРС.

Частота коливань пов'язана з періодом співвідношенням $f = \frac{1}{T}$. Якщо період вимірюється в секундах, то частота - у герцах (Гц). У більшості країн, включаючи Україну, промислова частота змінного струму становить 50 Гц (у США і Японії - 60 Гц).

Зміна напруги, струму та ЕРС з часом може бути зображена на діаграмі



Мал. 3. Параметри змінного струму

Величина промислової частоти змінного струму обумовлена техніко-економічними міркуваннями. Якщо вона занадто низка, то збільшуються габарити електричних машин і, отже, витрата матеріалів на їхнє виготовлення; помітним стає миготіння світла в електричних лампочках. При занадто високих частотах збільшуються втрати енергії, пов'язані з перемагнічуванням сердечників електричних машин і трансформаторів. Тому найбільш оптимальними виявилися частоти 50-60 Гц. Однак у деяких випадках використовуються змінні струми як з більш високої, так і з більш низькою частотою. Наприклад, у літаках застосовується частота 400 Гц. На цій частоті можна значно зменшити габарити й вагу трансформаторів і електромоторів, що для авіації більш суттєво, ніж збільшення втрат у сердечниках. На залізницях використовують змінний струм із частотою 25 Гц і навіть 16,66 Гц.

Електричне коло струму

В загальному випадку електричне коло змінного струму може мати резистивні (R), індуктивні (L) та ємнісні елементи (C).

2.1.1 Коло змінного струму з резистивним елементом

Резистивний (активний) опір R – це елемент, в якому відбувається необоротний процес перетворення електричної енергії в теплову |.

При підключенні активного опору R до джерела (рис. 3.1, а) з напругою $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, де U_m – амплітуда напруги, ω [рад/с] – кругова частота ($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, де f [Гц] – циклова частота, T [с] – період), ψ_u – початкова фаза напруги, то у відповідності до закону Ома в колі протікатиме струм

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (3.1)$$

амплітуда якого

$$I_m = \frac{U_m}{R}, \quad (3.2)$$

а початкова фаза $\psi_i = \psi_u$, тобто кут зсуву фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$, звідки слідує, що коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 1$.

Таким чином, в колі змінного струму з активним опором струм змінюється за тим же законом, що й напруга (рис. 3.1, б) і вони співпадають за фазою.

Векторна діаграма напруги і струму резистивного елемента приведена на рис. 3.1, в.

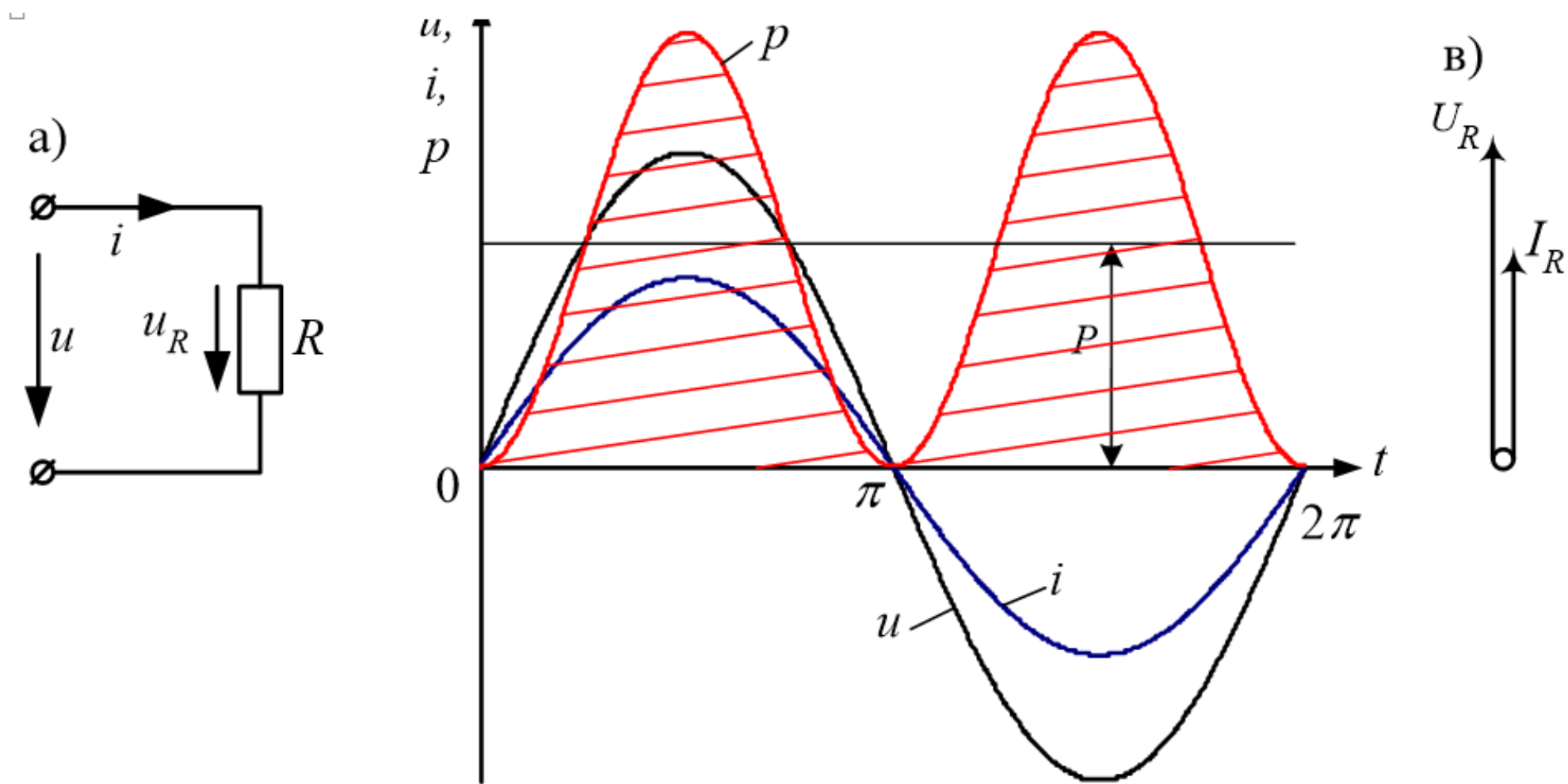


Рисунок 3.1 – До розгляду кола змінного струму з резистивним елементом:
 а – схема; б – графіки синусоїдальних напруги і струму; в – векторна діаграма

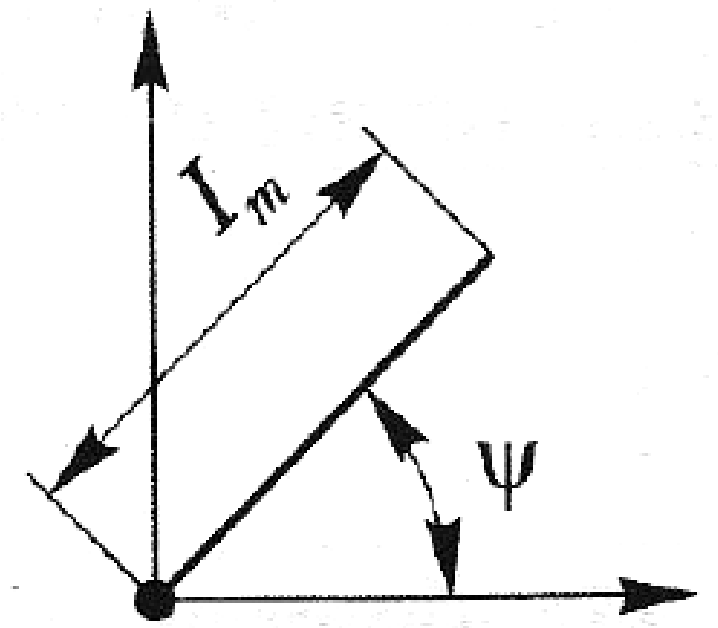
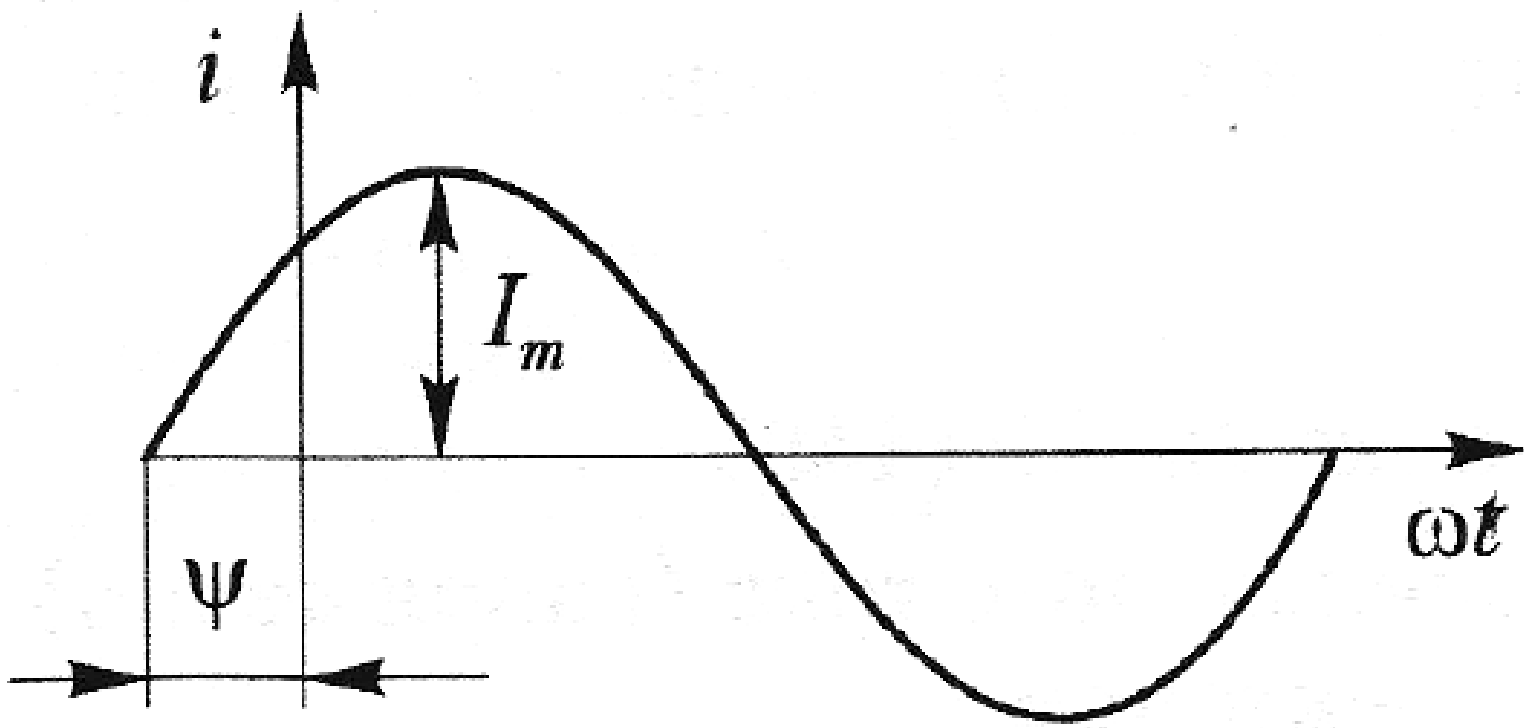
Метод *векторних діаграм*, тобто зображення величин, що характеризують змінний струм векторами, а не тригонометричними функціями, надзвичайно зручний. Тому коротко викладемо його основи.

При описі електричного ланцюга змінного струму за допомогою векторних діаграм кожному струму й напрузі зіставляється вектор на площині в полярних координатах, *довжина* якого дорівнює *амплітуді* струму або напруги, а полярний *кут* - відповідний до *фази*.

Нехай заданий синусоїдальний струм

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

Графік цього струму має вигляд синусоїди, зображеної на мал. 4. Поруч зображений вектор, що відповідає побудованій синусоїді. Цей вектор із модулем, що дорівнює амплітуді, нахилений до горизонтальної осі під кутом ψ



Мал. 4. Графік синусоїдального струму і його векторна діаграма

Як видно з рис. 3.1, б, миттєва потужність $p(t)$ коливається з подвійною частотою навколо середнього значення P від нуля до амплітудного значення, тобто завжди залишається додатною.

Середнє значення потужності за період визначається як

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_0^T ui \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T [UI(1 - \cos 2\omega t)] \cdot dt = UI \quad (3.3)$$

або ж як

$$P = RI^2.$$

Коло змінного струму з індуктивністю

Індуктивність L [Гн] – характеризує властивість елемента кола, наприклад індуктивної котушки, під дією струму в ньому створювати власне магнітне поле.

Індуктивний опір (реактивний опір індуктивності) прямо пропорційний частоті змінного струму і індуктивності кола:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \text{ [Ом]}. \quad (3.4)$$

Напруга на індуктивному опорі визначається як

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L\omega I_m \cos(\omega t + \psi_i) \quad (3.5)$$

Або ж як

$$u_L = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (3.6)$$

звідки слідує, що в колі з *індуктивною котушкою* (рис. 3.2, а) *струм відстає від напруги на 90°* , тобто $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$ (рис. 3.2, б, в), а коефіцієнт потужності – $\cos\varphi = 0$.

Закон Ома для діючих значень напруги і струму в колі з котушкою записується як

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (3.7)$$

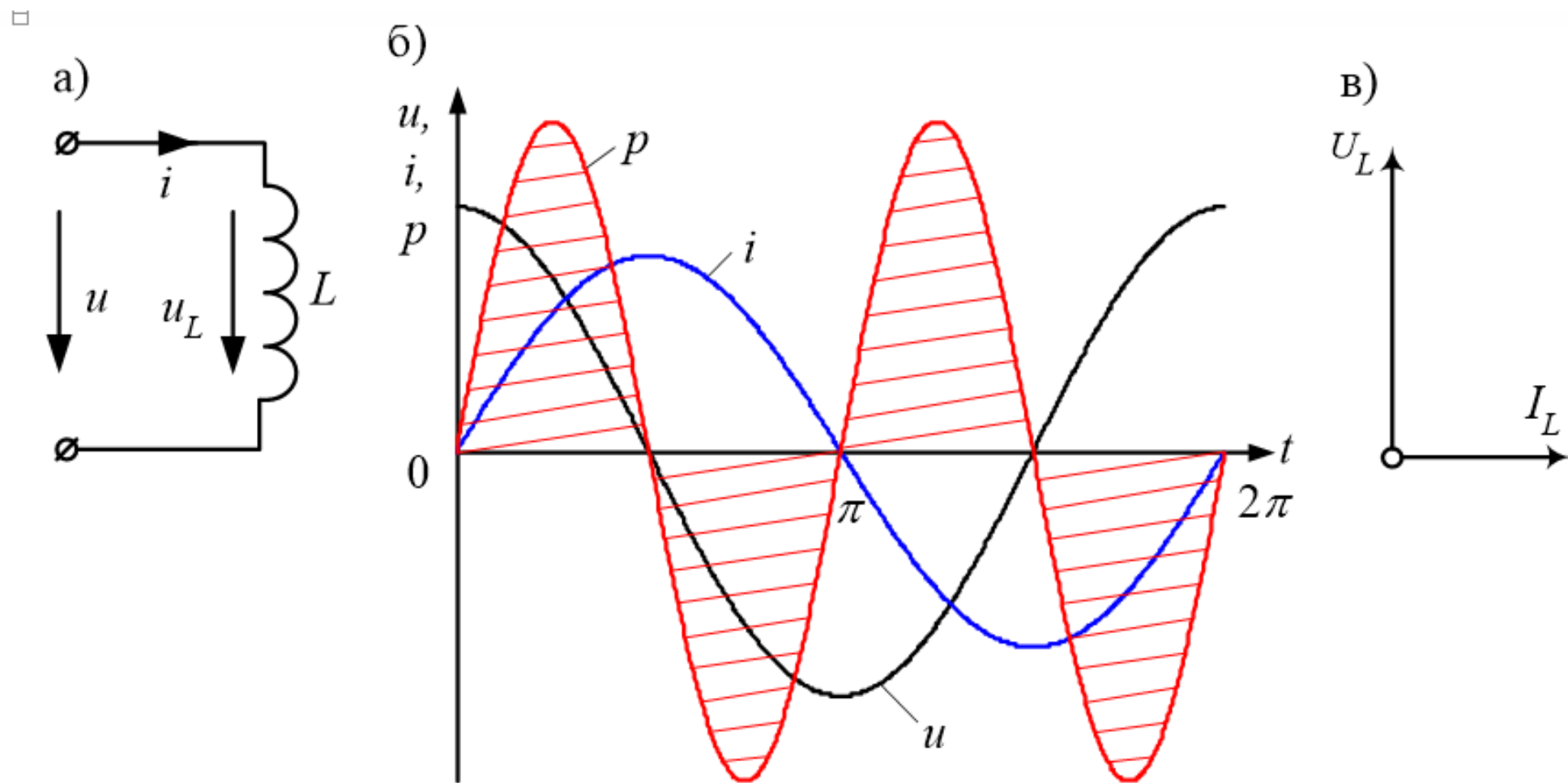


Рисунок 3.2 – До розгляду кола змінного струму з ідеальною індуктивною котушкою: а – схема; б – графіки синусоїдальних напруги і струму; в – векторна діаграма

Діюча змінна напруга зв'язана з амплітудою співвідношенням

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.8)$$

Із часової діаграми (рис. 3.2, б) видно, що потужність $p(t)$ в колі з індуктивністю змінюється від нуля до амплітудного значення двічі за період, змінюючи свій знак:

Миттєва потужність в колі з індуктивністю визначається за формулою

$$p(t) = u \cdot i = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot I_m \sin \omega t = UI \sin 2\omega t. \quad (3.9).$$

Середнє значення потужності за період визначається як

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_0^T ui \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t \cdot dt = 0, \quad (3.10)$$

тобто індуктивність активної потужності не споживає, що свідчить про наявність періодичного процесу обміну енергією між джерелом електричної енергії й магнітним полем індуктивності. Цю енергію називають *реактивною енергією*, а відповідну їй потужність – *реактивною потужністю*:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X_L \text{ [ВАр]}. \quad (3.11)$$

Коло змінного струму з конденсатором

Ємність C [Ф] – характеризує властивість елемента кола, наприклад конденсатора, накопичувати електричні заряди і створювати електричне поле.

В електричних установках ємності утворюються між проводами, проводами і землею в лініях електропередач, а також між іншими елементами струмоведучих конструкцій. В силових електроустановках використовуються конденсатори для підвищення коефіцієнту потужності. В радіотехніці конденсатори застосовуються в коливальних контурах, фільтрах тощо.

Ємнісний опір (реактивний опір конденсатора) обернено пропорційний частоті синусоїдального струму і ємності конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \text{ [Ом]}. \quad (3.12)$$

Якщо конденсатор увімкнути в коло змінного струму (рис. 3.3, а) із синусоїдальною напругою, то він буде заражатися в такт зміні прикладеної напруги.

Закон Ома для діючих значень напруги і струму в колі з конденсатором записується як

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (3.13)$$

Діюче значення струму в колі визначається як

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.14)$$

В колі з конденсатором струм випереджає напругу на 90° , тобто $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$ (рис. 3.3, б, в), а коефіцієнт потужності – $\cos\varphi = 0$.

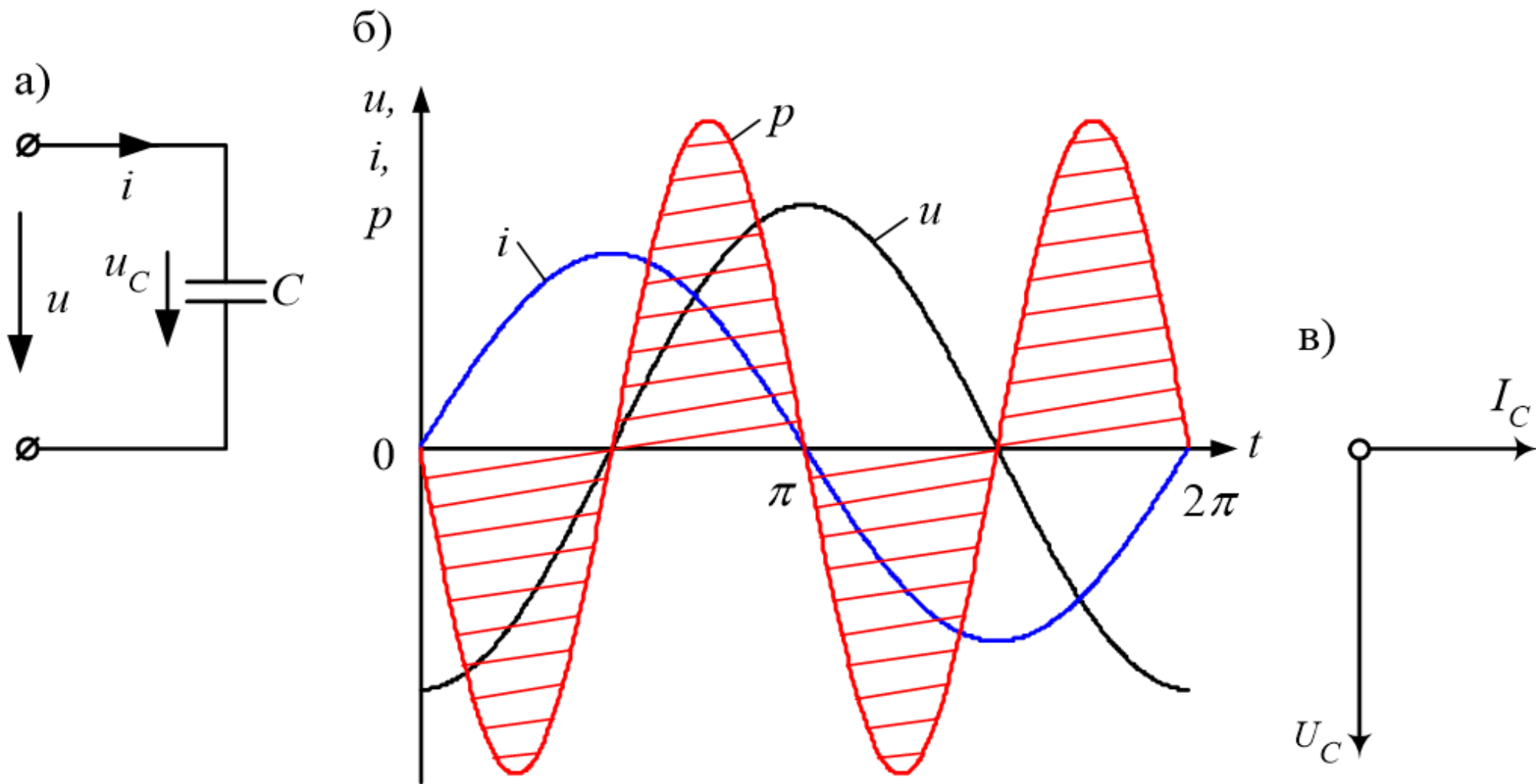


Рисунок 3.3 – До розгляду кола змінного струму з конденсатором:
 а – схема; б – графіки синусоїдальних напруги і струму;
 в – векторна діаграма

Із часової діаграми (рис. 3.3, б) видно, що потужність $p(t)$ в колі з конденсатором змінюється від нуля до амплітудного значення двічі за період, змінюючи свій знак.

Миттєве та середнє значення потужностей в колі з конденсатором визначається відповідно співвідношеннями (3.9) та (3.10), тобто, як і в колі з індуктивністю, відбувається неперервний обмін енергією між мережею та конденсатором. Потужність, що характеризує швидкість змін цієї енергії, називається *реактивною потужністю*:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X_C \text{ [ВАр]}. \quad (3.15)$$

Одиниця вимірювання — вольт-ампер реактивний (вар, вар)