ТЕМА 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

2.1. Змінний струм, його переваги перед постійним струмом і застосування

Спочатку електроенергетика розвивалась на базі невеликих електростанцій постійного струму, що працювали на привозному паливі. Кожна з станцій обслуговувала невеликий регіон або одне підприємство. Вартість виробництва електроенергії на цих станціях була високою.

Централізація виробництва електроенергії постійного струму була неможливою через складності передачі електроенергії на великі відстані, пов'язані з великими втратами при низькій напрузі передачі. Економічне централізоване виробництво електроенергії потребувало застосування різних напруг для генераторів, ЛЕП і електроприймачів, у зв'язку з чим виникла необхідність в перетворенні електроенергії однієї напруги в електроенергію іншої напруги. Ця проблема була вирішена введеним електроустановок змінного струму. Можливість трансформації змінного струму дозволила для кожного елемента електроустановки мати свою , найбільш відповідну умовам, напругу.

Перші установки змінного струму для технічних цілей були створені російським вченим Яблочковим в 70-х роках XIX-го сторіччя.

Сучасна електроенергетика побудована на використанні змінного струму і лише в деяких випадках використовується постійний струм. Електричні машини (генератори, двигуни) мають високі техніко–економічні показники, надійні в роботі і зручні в експлуатації.

Змінний струм - струм, який змінює і величину, і напрямок у часі. Як джерела живлення в техніці використовують генератори. Генератори змінного струму простіші у виготовленні, надійніші та дешевші за генератори постійного струму. Часто вживаються дуже прості і надійні двигуни змінного струму, особливо асинхронні двигуни. Ще однією суттєвою перевагою кіл змінного

струму є можливість його передачі на великі відстані. У промисловості здебільшого використовують змінний синусоїдальний струм.

Відмінність електричних кіл змінного струму від аналогічних кіл постійного струму полягає в тому, що математичний апарат їх дослідження стає більш громіздким, адже у рівняннях використовуються напруги і струми, що змінюються за гармонічним законом. Для спрощення задач аналізу в електротехніці використовуються графічні методи.

2.2. Основні поняття, параметри змінного синусоїдального струму

Синусоїдальний струм - змінний струм, що змінюється за гармонічним (або синусоїдальним) законом.

Значення змінних величин – ЕРС, напруг, струмів, потужностей – в будь–який момент часу ***t*** називаються миттєвими і позначаються буквами ***e, u, i, p.***

Миттєві значення синусоїдальної величини визначаються за такими формулами:

$$i = Im\ sin(\omega t + \psi_i\ ,\ u = Um\ sin(\omega t + \psi_u),\ e = Em\ sin(\omega t + \psi_e), \quad (2.1)$$

де - ***i, u, e*** миттєві значення сили струму, напруги та ЕРС.

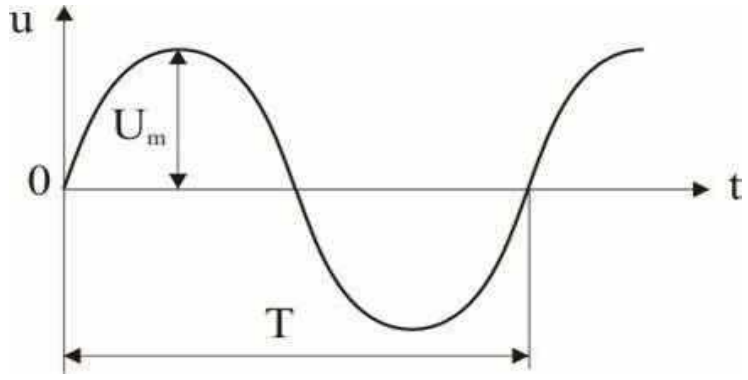


Рисунок 2.1 - Зображення синусоїдального сигналу

На рис.2.1. продемонстровано графічне зображення синусоїдального сигналу $u(t) = Um \sin(\omega t + \psi_u)$

в залежності від часу з початковою $\psi_u = 0$, амплітудою Um та кутовою частотою ω (одиниця вимірювання – рад/с, або с-1).

Основними параметрами змінного сигналу є:

а) період (Т) – час одного повного коливання; період зв'язаний з кутовою частотою ω формулою $T = 2\pi / \omega$; одиниця вимірювання – ***с*** (секунда);

б) частота коливань (f) – кількість коливань за одиницю часу; частота зв'язана з періодом ***формулою*** $T = 1 / f$; кутова частота зв'язана з лінійно частотою $f : \omega = 2\pi f$; одиниця вимірювання – ***Гц*** (Герц); стандартною промисловою частотою на Україні є частота 50Гц;

в) амплітуда коливань – максимальне значення синусоїдальної величини (Um , Im , Em - амплітуди напруги, струму та ЕРС);

г)початкова фаза коливань (Ψ_i , Ψ_u , Ψ_e) – визначає значення величин в початковий момент часу (***t=0***); одиниця вимірювання - ***радіан***. Початкова фаза завжди відраховується по осі абсцис від найближчого до початку координат нульового значення синусоїдальної величини, при її переході від від'ємних значень до додатних, до початку координат.

д) фаза коливань ($\omega t + \Psi$) - визначає миттєві значення величини (***i, u*** або ***e***); одиниця вимірювання – ***радіан***.

Різницю фаз між напругою на елементі і струмом через нього позначають через $\varphi = \Psi_u - \Psi_i$. Якщо $\varphi > 0$, то говорять, що напруга на елементі випереджає струм за фазою, якщо $\varphi < 0$, то напруга відстає за фазою від струму.

У практиці широко використовуються поняття ***діючого значення*** та ***середнього значення*** синусоїдальної величини. Діючим значенням синусоїдального струму є значення такого постійного струму, що виробляє еквівалентну змінному струму теплову чи механічну дію. **Діюче значення** струму, напруги та ЕРС позначаються як I , U , E та визначаються за формулами:

$$I = Im / \sqrt{2} ; \quad U = Um / \sqrt{2} ; \quad E = Em / \sqrt{2} . \qquad (2.2)$$

З аналізу формул витікає, що діюче значення величин в$\sqrt{2}$ разів менше, ніж їх амплітудні значення.

Зображення синусоїдальних величин

Є основні три способи зображення синусоїдальних величин: графіком зміни миттєвих значень в часі (рис.2.2),тригонометричними функціями, векторами, що обертаються і векторними діаграмами.

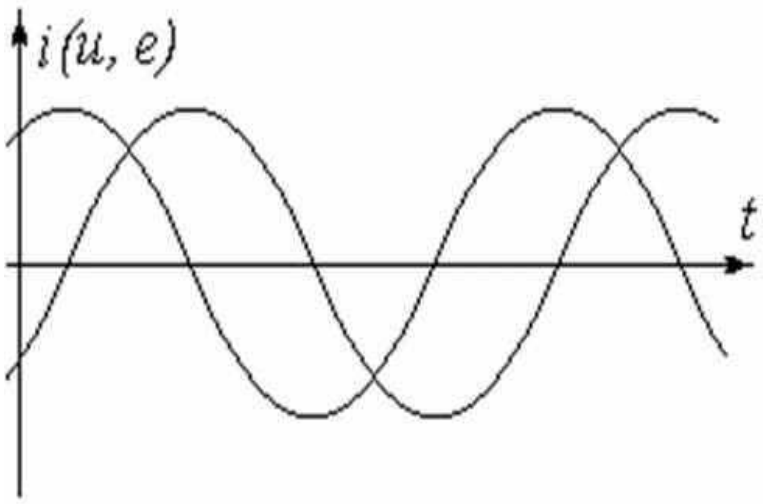


Рисунок 2.2 - Графічне зображення сінусоїдальних величин

- **Тригонометричі формули**

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)\ ,\ u = U_m \sin(\omega t + \psi),\ \ e = E_m \sin(\omega t + \psi). \qquad (2.3)$$

- **Векторне зображення синусоїдальних величин**

Для розрахунків кіл змінного струму ще використовується зображення синусоїдальних величин. Нехай маємо струм $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$. При зображенні синусоїдальних величин на круговій діаграмі з початку координат проводять вектори, рівні амплітудним значенням цих величин, під кутом ψ до горизонтальної осі. Позитивні кути ψ відкладають проти годинникової стрілки. Проекція обертаючого вектора на вісь ординат дорівнює миттєвому значенню синусоїдальної величини.

Для того, щоб зобразити його вектором, що обертається візьмемо прямокутну систему координат **xOy** (рис.2.3). Із початку координат **O** під кутом ψ проведемо вектор $\bar{I_m}$, довжина якого в масштабі відповідає Im .

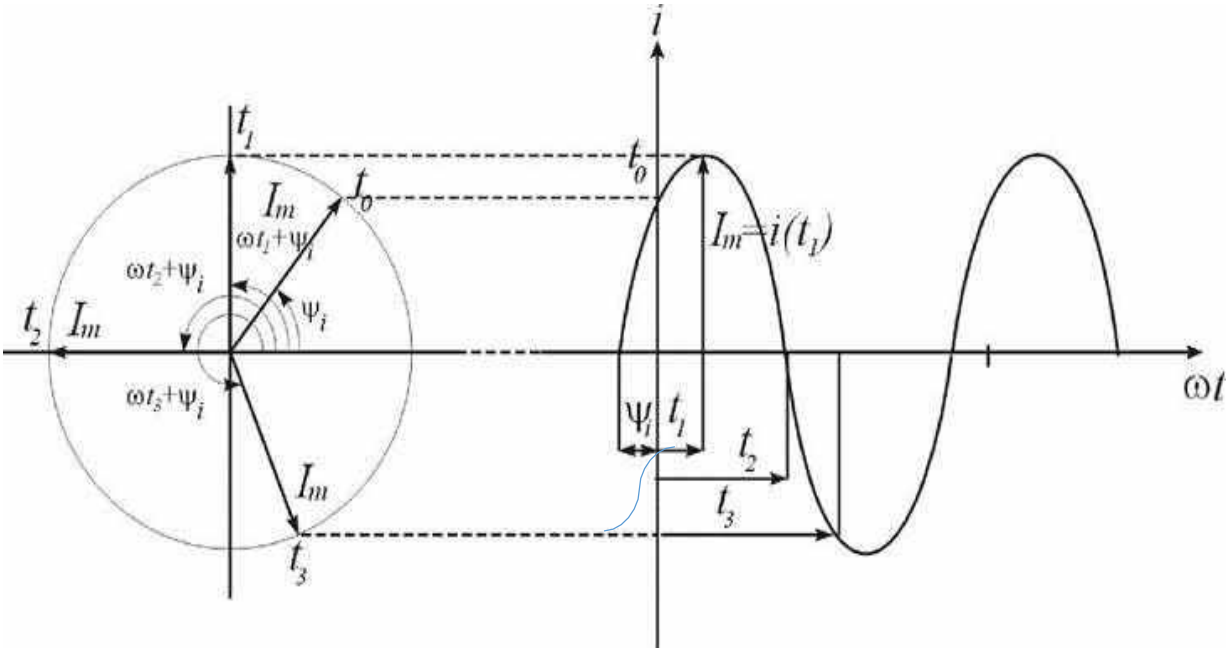


Рисунок 2.3 - Побудова векторної діаграми величин за допомогою векторів, що обертаються

Якщо вектор $\bar{I}m$ обертати проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю $\omega = 2\pi f$, то його проекція на вісь ординат ***Oy*** буде змінюватись за синусоїдальним законом, тобто відображати миттєве значення струму ***i***.

Сукупність векторів, що зображують на одному кресленні кілька синусоїдальних величин однієї частоти має назву **векторна діаграма**.

Вектори, що зображені на такій діаграмі мають однакову кутову частоту ω. Тому при обертанні їх взаємне розміщення не змінюється. І тому при побудові векторних діаграм один вектор можна направити довільно (наприклад, вздовж **Ox**), а інші розташовувати по відношенню до першого під різними кутами, рівними відповідним кутам зсуву фаз і осі координат не креслити.

В більшості випадків векторні діаграми кіл змінного струму призначені для визначення співвідношень між діючими значеннями напруг і струмів. Тому діаграми звичайно будують не для амплітудних значень, а для діючих, що обумовлює лише зменшення довжини векторів в $\sqrt{2}$ разів.

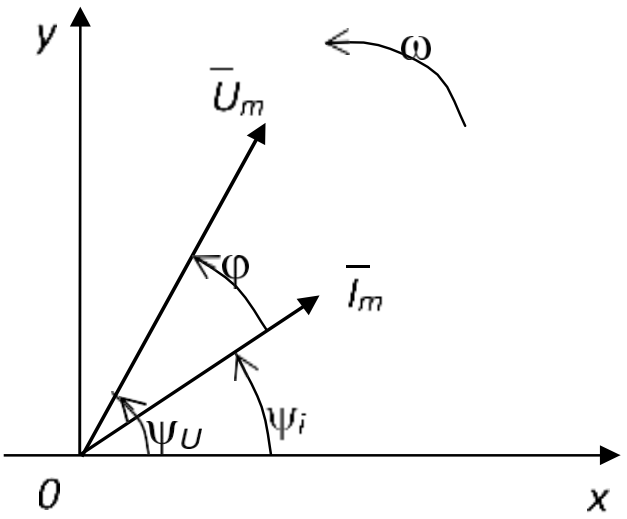


Рисунок 2.4 - Розташування векторів, що зображують синусоїди напруги й струму для початкового моменту часу

2.3. Елементи кіл змінного струму

Синусоїдальні кола, крім джерел, можуть включати такі елементи:

- Резистор – активний опір **R**;
- Котушка індуктивності – індуктивність **L**;
- Конденсатор – ємність **C**.

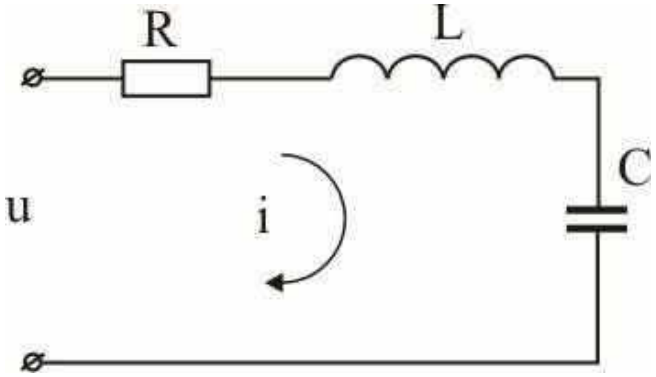


Рисунок 2.5 - Елементи кіл змінного струму

а) Резистивний елемент R

Опір резистивного елемента в колі змінного струму називається активним. В резистивних елементах електрична енергія корисно перетворюється в інші види енергії або розсіюється як теплова.

б) Індуктивний елемент L

Індуктивний елемент уявляє собою котушку, намотану на магнітному або немагнітному осерді, по обмотках якої протікає струм. Індуктивний елемент характеризується індуктивністю ***L.*** Схематичне позначення котушки індуктивності на електричних схемах наведено на рис.2.5.

Напруга на котушці індуктивності пов'язана зі струмом через неї формулою:

$$U_L = L\, dI_L / dt\,. \qquad (2.4)$$

Величина $X_L = \omega L$ має розмірність опору і називається індуктивним опором. Індуктивний опір відрізняється від активного і має назву реактивного опору. Індуктивний опір $X_L = \omega L$ підвищується з підвищенням частоти струму та індуктивності елемента. Індуктивність у колі постійного струму не має реактивного опору.

в) Конденсатор C

Схематичне позначення конденсатора наведено на рис.2.5. Ємністю конденсатора називається відношення електричного заряду q до різниці потенціалів між його електродами U_C : $C = q / U_C$. Між зарядом q і струмом через конденсатор i_C, що забезпечує зміну заряду, існує зв'язок:

$$i_C = dq / dt = C\, du_C / dt\,. \qquad (2.5)$$

Величина $X_C = 1/\omega C$ має розмірність опору та називається ємнісним опором. Ємнісний опір, як і індуктивний, є ***реактивним опором***.

Ємнісний опір постійному струму дорівнює нескінченності і $X_C = 1/\omega C$ зменшується при підвищенні частоти змінного струму та ємності елемента.

2.4. Закони Ома і Кірхгофа

Закон Ома і закони Кірхгофа для миттєвих значень напруг і струмів формулюються однаково і незалежно від того, чи є кола лінійні чи нелінійні, змінюються чи не змінюються в них напруги та струми в часі.

Так, відповідно до першого закону Кірхгофа, алгебраїчна сума миттєвих значень струмів в вузлі електричного кола дорівнює нулю:

$$\sum i_K = 0. \qquad (2.6)$$

Рівняння другого закону Кірхгофа формулюється так: алгебраїчна сума миттєвих значень напруг , які діють на всіх ділянках у будь-якому контурі електричного кола, дорівнює нулю, тобто:

$$\sum U_K = 0 . \qquad (2.7)$$

З урахуванням закону Ома, другий закон Кірхгофа може бути сформульований так: алгебраїчна сума падіння напруг на активних і реактивних елементах будь-якого контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, які діють в цьому контурі. Правила запису рівнянь залишаються такими, як і для електричних кіл постійного струму.

Закон Ома для змінного струму

$$I = U / Z , \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} , \qquad (2.8)$$

де **Z** – повний опір кола змінного струму;

R - активний опір;

X_L – реактивний індуктивний опір;

X_C - реактивний ємнісний опір.

2.5. Електричні кола змінного струму з послідовно з'єднаними ідеальними елементами R, L, C

Розглянемо електричне коло (рис.2.5), яке містить у собі послідовно з'єднані активний опір **R**, індуктивність **L** та ємність **C,** що живляться від ідеального джерела синусоїдального струму $i(t) = Im \sin\omega t$. (2.9)

Поставимо перед собою задачу визначити напругу на кожному елементі та напругу **U** і яка може бути виміряною на клемах джерела струму.

Відповідно до другого закону Кірхгофа, для миттєвих значень напруг маємо:

$$u = u_R + u_L + u_C , \qquad (2.10)$$

де $u_R = iR$ - миттєве значення напруги на резисторі;

$u_L = Ldi / dt$ - миттєве значення напруги на котушці індуктивності;

$u_C = 1/C \int i dt$ - миттєве значення напруги на конденсаторі.

Підставивши формулу (2.9) в (2.10), одержимо

$$u = RI_m \sin\omega t + \omega L I_m \cos\omega t - (1 / \omega C) I_m \cos\omega t, \quad (2.11)$$

де $\omega = X_L$ та $1 / \omega C = X_C$ - чисельні значення реактивних опорів котушки індуктивності і конденсатора відповідно, а величина $X_L - X_C = X$ називається реактивним опором схеми. Внаслідок цього маємо

$$u = I_m (R\sin\omega t + X \cos\omega t). \quad (2.12)$$

Використовуючи математичні перетворення получим

$$u = I_m \sqrt{R^2 + X^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) = I_m Z \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.13)$$

де $\varphi = arctg\, X / R$ - зсув фаз між напругою на вході схеми і струмом;

Z - чисельне значення повного опору схеми.

2.6. Векторна діаграма напруг. Співвідношення між струмом і напругою. Трикутник напруг, опорів. Резонанс напруг

Векторні діаграми для діючих значень величин будуємо згідно з другим законом Кірхгофа, записаним у векторній формі: вектор напруги, прикладеної до кола, дорівнює геометричній сумі векторів напруг на окремих її ділянках

$$\overline{U} = \overline{U}_R + \overline{U}_L + \overline{U}_C , \quad (2.14)$$

де $\overline{U}$ - напруга прикладена до кола.

Векторні діаграми будуємо для трьох випадків:

а) $X_L > X_C$; **б)** $X_L < X_C$; **в)** $X_L < X_C$.

Будемо вважати, що початкова фаза струму $\Psi = 0$.

а) Розглянемо перший випадок: $X_L > X_C$

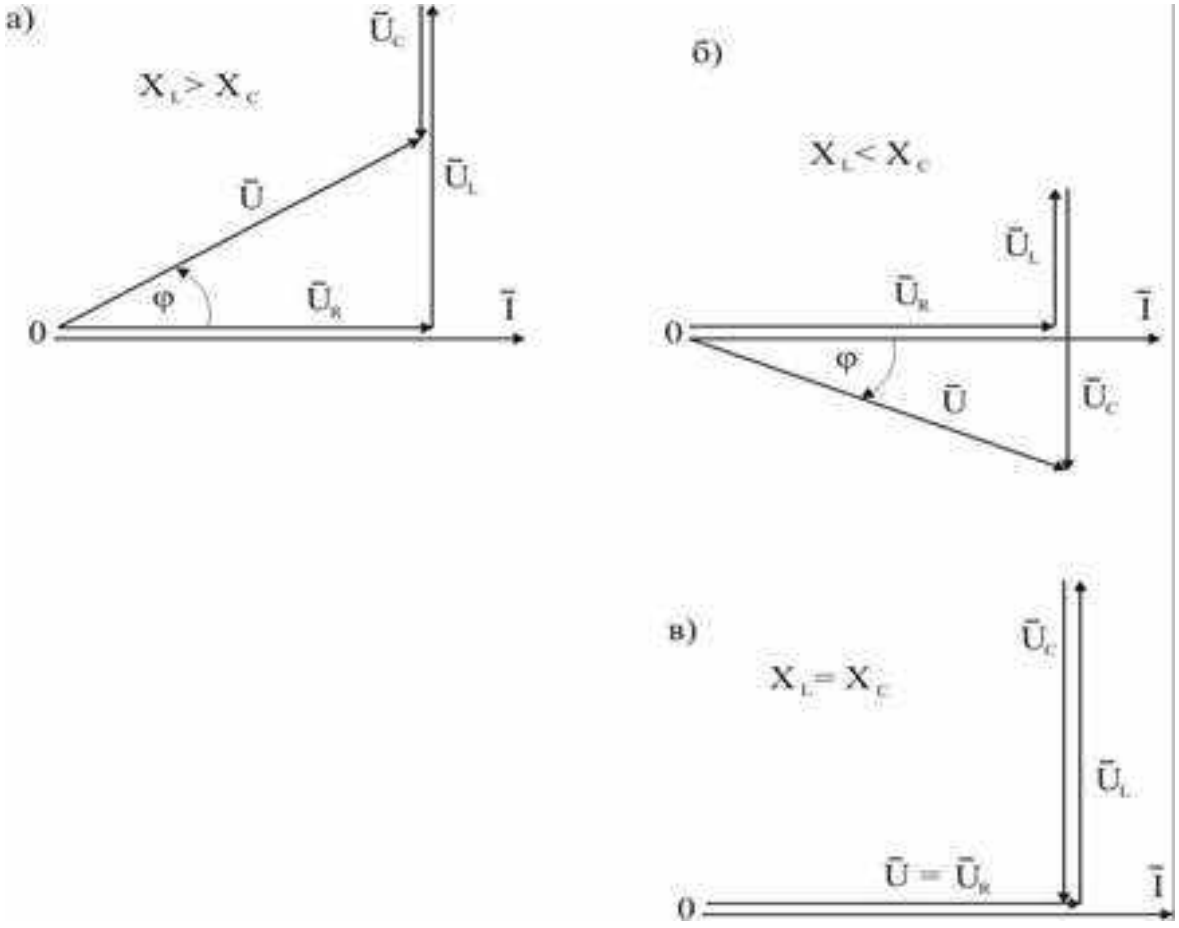


Рисунок 2.6 - Векторні діаграми

На ній вздовж дійсної осі(рис.2.6,а) в обраному масштабі відкладений вектор струму $\bar{I}$. Потім паралельно до $\bar{I}$ відкладаємо у масштабі вектор напруги на резисторі $\overline{U_R} = \bar{I}\,R$. Так як на котушці індуктивності напруга випереджає струм за фазою на 90^0, то вектор $\overline{U_L} = \bar{I}\,X_L$ повертаємо відносно вектора $\bar{I}$ на 90^0 проти годинникової стрілки і прикладаємо його до кінця вектора $\overline{U_R}$. Вектор $\overline{U_C} = \bar{I} \cdot X_C$ - вектор напруги на конденсаторі, який відстає від вектора струму на кут 90^0, тому обертаємо його за годинниковою стрілкою на 90^0 і прикладаємо до кінця попереднього вектора $\overline{U_L}$.

Кут зсуву φ між векторами U та $\bar{I}$ при $X_L > X_C$ є додатним і **коло має індуктивний характер.**

б) Випадок $X_L < X_C$.

Векторна діаграма приведена на рис.2.6,б. При $X_L < X_C$ зсув фаз між векторами $\overline{U}$ та $\overline{I}$ є від'ємним і **коло має ємнісний характер.**

в) При $X_L = X_C$ маємо особливий режим (рис.2.6,в): так як вектори $\overline{U_L}$ і $\overline{U_C}$ рівні за величиною, але протилежно направлені (тобто знаходяться в протифазі), тому їх геометрична сума дорівнює нулю. **Такий режим називається *резонансом* напруг.**

Як видно з векторної діаграми, при резонансі напруг напруга на вході кола $\overline{U}$ чисельно дорівнює падінню напруги на активному опорі R, а зсув фаз між векторами $\overline{U}$ та $\overline{I}$ дорівнює нулю. Якщо активний опір R малий, то виникає значний струм (рис.2.7) та великі напруги на ємності та індуктивності, що можуть бути значно більшими, ніж напруга мережі.

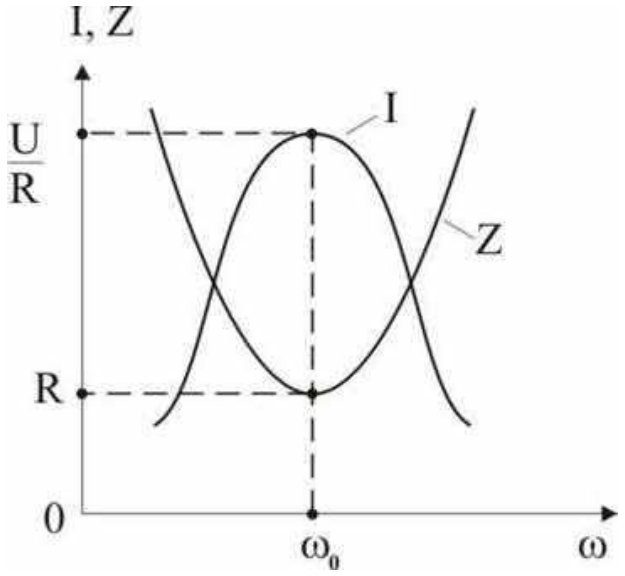


Рисунок 2.7 - Резонанс напруг

Частоту змінного струму ω_0 , при якій виникає резонанс, називають ***резонансною***. Її визначають з умови рівності реактивних опорів:

$$\omega_0 L = 1 / \omega_0 C \text{ , звідки } \omega_0 = 1/\sqrt{LC} . \qquad (2.15)$$

Резонанс у контурі настає тоді, коли власна частота контуру співпадає з частотою джерела живлення.

Напруга на активному опорі $U_R = I \cdot R = U$, тобто напруга на активному опорі дорівнює повній напрузі, яка прикладена до кола.

Енергетичний процес при резонансі напруг можна розглядати як накладання двох процесів: безповоротного процесу перетворення спожитої від джерела енергії в тепло, яке виділяється на активному опорі кола, і зворотного процесу, що являє собою коливання енергії всередині кола: між магнітним полем котушки і електричним полем ємності. Перший процес характеризується величиною активної потужності $P = R \cdot I^2$, а другий – величиною реактивної потужності $Q = X_L \cdot I^2 = X_C \cdot I^2 = Q_C$. Коливання енергії між джерелом живлення і ділянкою кола, яка включає котушку і ємність, не відбувається, тому реактивна потужність всього кола дорівнює

$$Q = X \cdot I^2 = 0. \qquad (2.16)$$

Властивості кола при резонансі напруг

1. Загальний опір дорівнює активному опору, отже стає найменшим.
2. Струм стає найбільшим і співпадає по фазі з напругою. Така ситуація представляє загрозу пробою ізоляції електроустановок та загрозу життю обслуговуючого персоналу. **Тому режим резонансу напруг недопустимий і потребує заходів по його запобіганню.**
3. Кут зсуву фаз становиться рівним нулю і, значить, коло має чисто активний характер.
4. Напруга на коливальному контурі, тобто на реактивних елементах L і C стає максимальною і може багатократно перевищувати напругу на активному опорі.
5. Напруга в колі змінного електричного струму не дорівнює сумі напруг на кожній ділянці цього кола.

Хоча резонанс напруг і шкідливий для певних випадків, але його активно використовують у техніці зв’язку для вибору необхідної частоти передачі і прийому сигналів. Наприклад, радіоприймач приймає ту радіостанцію, частота якої відповідає резонансній частоті вхідного коливального контуру приймача.

Із умов виникнення резонансу $\mathbf{X_L = X_C}$, або $\boldsymbol{\omega L = 1 / \omega C}$ виходить, що *практично резонанс напруг можна отримати наступними шляхами*:

– змінюючи величину ємності $\boldsymbol{C = 1 / \omega^2 L}$;

– змінюючи величину індуктивності $\boldsymbol{L = 1 / \omega^2 C}$;

– змінюючи частоту мережі (це будуть вимушені коливання)

$$\boldsymbol{\omega = 1 / \sqrt{L \cdot C}}.$$

Трикутник напруг і опорів

а) Трикутник напруг

Аналіз векторних діаграм (рис. 2.6) показує, що вектор прикладеної до кола напруги можна розглядати як геометричну суму векторів $\overline{\boldsymbol{Ua}} = \boldsymbol{RI}$ і $\overline{\boldsymbol{U_P}} = \boldsymbol{j \cdot X \cdot I}$. Вектор $\overline{\boldsymbol{Ua}}$ (вектор результуючої напруги на активних елементах кола) співпадає за фазою з вектором струму $\bar{I}$ вектор $\overline{\boldsymbol{U_P}}$ (вектор результуючої напруги на реактивних елементах кола) (рис.2.4) перпендикулярний вектору $\overline{\boldsymbol{I}}$ і повернутий вліво від нього, якщо $\boldsymbol{\varphi > 0}$ - тобто коло має індуктивний характер, або вправо від нього, якщо $\boldsymbol{\varphi < 0}$ (тобто коло має ємнісний характер).

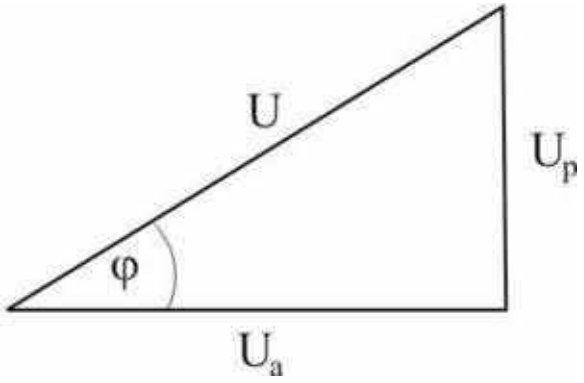


Рисунок 2.8 - Трикутник напруг

В одержаному ***трикутнику напруга*** $\overline{\boldsymbol{Ua}}$ (рис.2.8) співпадає за фазою зі струмом і називається *активною складовою напруги*:

$$\overline{U}a = U\cos\varphi = R\,I. \qquad (2.17)$$

Напруга $\overline{U}_P$ зсунута за фазою на кут $\pi/2$ відносно струму і називається *реактивною складовою напруги*:

$$\overline{U}_P = U\sin\varphi = U\,I. \qquad (2.18)$$

Виходячи с трикутника (рис. 2.8) напруга на затискачах кола

$$U = \sqrt{Ua^2 + U_P^2}\,. \qquad (2.19)$$

б) Трикутник опорів одержуємо з трикутника напруг.

Довжини сторін трикутника опорів визначаються шляхом ділення відповідних напруг на значення струму (рис.2.9).

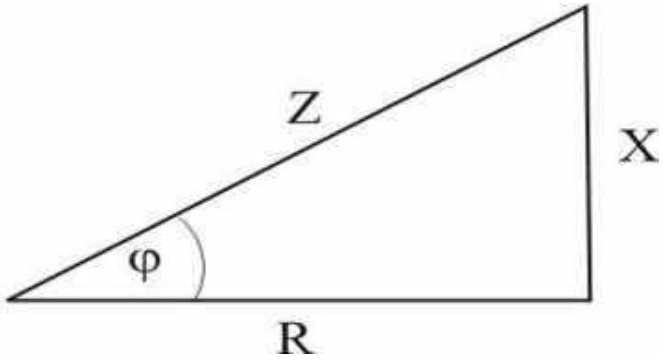


Рисунок 2.9 - Трикутник опорів

З трикутника опорів знаходимо співвідношення:

$$\cos\varphi = R/Z;\quad \sin\varphi = X/Z;\quad tg\varphi = X/R;\quad Z = \sqrt{R2 + X2}\,. \qquad (2.20)$$

2.7. Електричне коло з паралельно з'єднаними елементами R, L, C. Співвідношення між струмом та напругою. Векторна діаграма струмів. Резонанс струмів

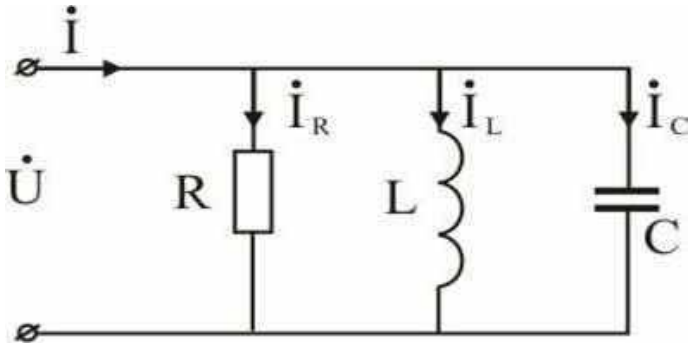


Рисунок 2.10 - Паралельне з'єднання елементів

При паралельному з'єднанні елементів (рис.2.10) рівняння за першим законом Кірхгофа для миттєвих значень та у комплексній формі мають такий вигляд:

$$i = i_R + i_L + i_C \qquad I = I_R + I_L + I_C \tag{2.21}$$

Через провідності: g - активну, b_L – реактивну індуктивну, b_C - реактивну ємнісну струми можна записати у комплексному вигляді:

$$I_R = g\,U\ , \quad I_L = -jb_L\,U\ , \quad I_C = jb_C\,U\ ,$$

де U -комплексне діюче значення напруги на вході кола; ($-jb_L$) – комплексне значення індуктивної провідності; (jb_C) – комплексне значення ємнісної провідності.

Тому рівняння (2.21) можна записати у вигляді:

$$I = gU - jb_L\,U + jb_C\,U,\ I = (g - jb_L + jb_C)U. \tag{2.22}$$

Різниця $(b_L - b_C) = b$ називається ***реактивною провідністю***, а величина $y = g - jb$ ***комплексною провідністю*** кола (де $b > 0$ при $b_L > b_C$, $b < 0$ при $b_L < b_C$).

Закон Ома в комплексному вигляді для розгалуженого кола:

$$\mathrm{I} = y\,U\,. \tag{2.23}$$

Побудова векторних діаграм для кола з паралельно з'єднаними елементами.

Векторні діаграми для діючих значень величин будуємо згідно з першим законом Кірхгофа, записаним у векторній формі: $\overline{I} = \overline{I}_R + \overline{I}_L + \overline{I}_C$, враховуючи зсув фаз φ між напругою і струмом і вважаючи, що початкова фаза напруги дорівнює нулю ($\Psi_U = 0$).

Векторні діаграми будуємо для трьох випадків:

а) $\mathbf{b_L > b_C}$ (рис.2.11, а) ; б) $\mathbf{b_L < b_C}$ (рис.2.11,б); в) $\mathbf{b_L = b_C}$ (рис.2.11,в).

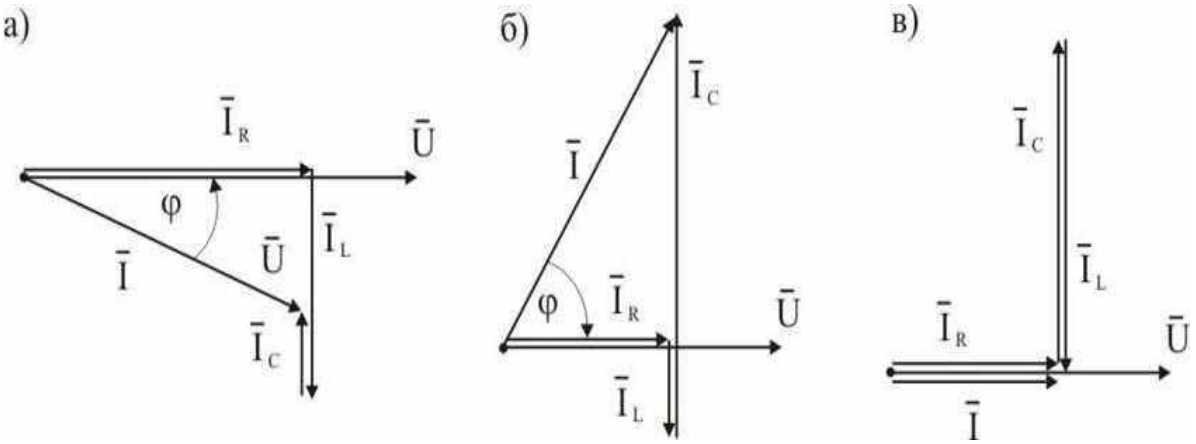


Рисунок 2.11 - Векторні діаграми

Резонанс струмів спостерігається в розгалужених колах при умові $\mathbf{b_L=b_C}$**.** (рис.2.11,в). У цьому разі струми у гілках з реактивними елементами рівні і повернені в протилежні боки. Струми у гілках з реактивними елементами можуть значно перевищувати струм у нерозгалуженій ділянці кола, який в момент резонансу набуває мінімального значення (рис.2.12). Повна провідність кола дорівнює тільки активній провідності (**y=g**). Як і при резонансі напруг, при резонансі струмів мають місце співвідношення: $\boldsymbol{\varphi = 0}$, $\boldsymbol{\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}}$.

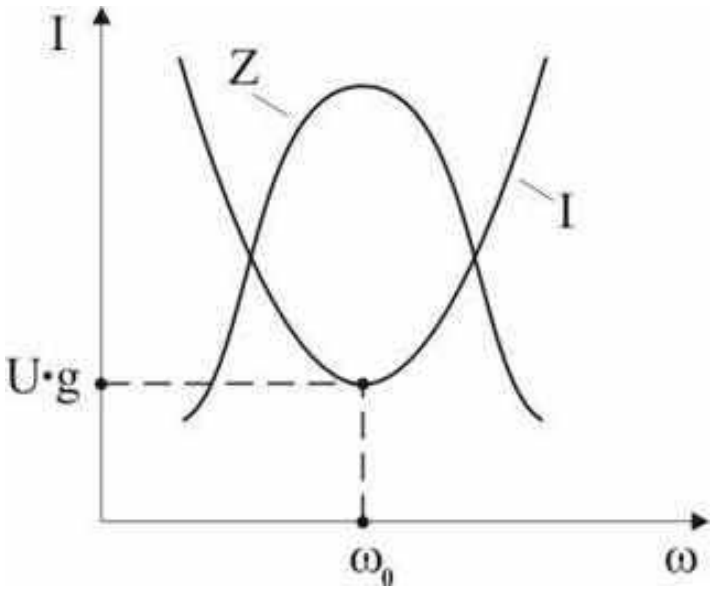


Рисунок 2.12 - Резонанс струмів

Так як напруга на всіх елементах при паралельному з'єднані однакова, то резонанс струмів не представляє небезпеку. Тому він широко використовується в енергетиці, радіотехніці, телебаченні, техніці зв'язку.

Трикутник струмів.

Аналіз векторних діаграм (рис.2.11,а і б) показує, що вектор струму $\overline{I}$ на нерозгалуженій ділянці кола можна розглядати як векторну (геометричну) суму векторів $\overline{I}_A$ і $\overline{I}_P$.

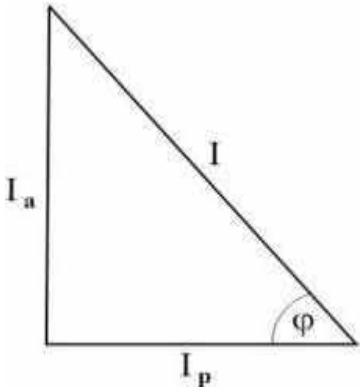


Рисунок 2.13 - Трикутник струмів

В одержаному трикутнику струмів (рис.2.13) вектор $\overline{I}_A$ (вектор струму через активні елементи кола) співпадає за фазою з вектором напруги $\overline{U}$, а вектор $\overline{I}_P$ (вектор результуючого струму через реактивні елементи кола) перпендикулярний вектору $\overline{U}$.

З трикутника струмів діючезначення струму

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_P^2}, \quad \text{де} \quad I_A = Ug \ , \ I_P = Ub \ . \tag{2.24}$$

2.8. Потужність в колах змінного струму

Як відомо, потужність постійного струму є добутком напруги на силу струму.

У разі змінного струму і напруга, і сила струму періодично змінюються в часі. Тому потужність змінного струму можна подати у вигляді активної та реактивної потужності.

Активна потужність.

Активна потужність споживається активним опором, де відбувається перетворення електричної енергії в енергію іншого виду (механічну, світлову, теплову…)

$$P = U\, I \cos\varphi, \tag{2.25}$$

де U, I – діючі значення сили струму та напруги;

$\cos\varphi$ - коефіцієнт потужності.

Одиниці вимірювання активної потужності: [P] =Вт.

Реактивна потужність.

Реактивна потужність накопичується котушкою індуктивності під час зростання сили струму в колі у вигляді магнітного поля.

$$Q = U\, I \sin\varphi = I^2 X_L\,. \tag{2.26}$$

Одиниця вимірювання реактивної потужності : [Q] = ВАР.

Реактивна потужність не споживається приймачем енергії і не бере участі у процесі перетворення електричної енергії в енергію іншого виду. Ця потужність циркулює між джерелом і приймачем енергії, навантажуючи при цьому проводи їхніх обмоток і ліній, що з'єднують приймач енергії із джерелом, а також збільшує втрати енергії в них.

Повна потужність кола змінного струму є величиною комплексною і визначається добутком комплексного значення напруги на спряженого комплексного значення струму $\tilde{S} = \dot{U}\ \ \dot{I}$ і може бути представленою в алгебраїчній та тригонометричній формах у вигляді дійсної і уявленої частин:

$$S = P + jQ\,,\quad S = S\cos\varphi + jS\sin\varphi\,, \tag{2.27}$$

де S – модуль повної потужності (одиниця вимірювання - В·А);

Q - реактивна потужність – потужність (одиниця вимірювання - Вар).

Модуль повної потужності визначається за формулою

$$S = U I . \quad (2.28)$$

Якщо трикутник напруг (рис.2.8) помножити на струм *I*, то отримаємо подібний ***трикутник потужностей*** (рис.2.14). P - активна потужність (одиниця вимірювання – Вт); **Q** - реактивна потужність – потужність (одиниця вимірювання - Вар).

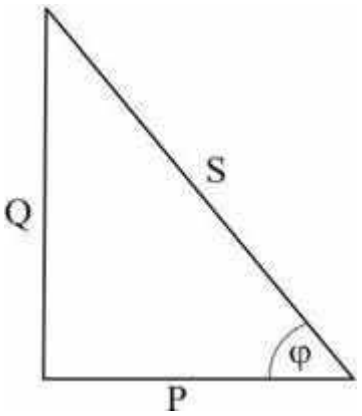


Рисунок 2.14 - Трикутник потужностей

Трикутник потужностей дає наступні співвідношення:

$$P = S \cos \varphi,\ Q = S \sin \varphi;\ \varphi = arc \cos P / S,\ S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (2.29)$$

Наведені потужності також можуть бути розрахованими за діючим значенням струму і відповідного опору за формулами:

$$P = I^2 R \quad , \quad Q = I^2 X \ , \quad S = I^2 Z . \quad (2.30)$$

Коефіцієнт потужності показує, *яка частина повної потужності споживається електричним колом, тобто ступінь використання електричної енергії.*

Більшість крупних споживачів електроенергії уявляють собою електромагнітні механізми, наприклад, двигуни, трансформатори, в яких змінний магнітний потік зв'язаний з обмотками. Внаслідок цього в обмотках при протіканні змінного струму індуктуються реактивні ЕРС, які обумовлюють зсув фаз φ між напругою і струмом. Цей зсув фаз звичайно збільшується, а $\cos \varphi$ зменшується при малому навантаженні. Наприклад, якщо $\cos \varphi$ двигунів змінного струму при повному

навантаженні складає **0,75-0,8** , то при малому навантаженні він зменшується до **0,2-0,4.**

Якщо потужність ***P***, яка споживається всіма приймачами в даних колах, є повністю визначеною, то при незмінній напрузі на затискачах приймачів їх струм обернено пропорційний до коефіцієнта потужності***:***

$$I = P / U \cos \varphi. \qquad (2.31)$$

Із зменшенням $\cos \varphi$ струм навантаження електричної станції і підстанцій буде збільшуватися при одній і тій же потужності, що виділяється.

Разом з тим електричні генератори, трансформатори та електричні мережі розраховуються на певні значення напруги і струму. Тому, наприклад, при $\cos \varphi = 0{,}5$ і повному завантаженні струмом генераторів, трансформаторів і мереж потужність, яка передається приймачам, буде складати всього **50%** від потужності, яка могла бути переданою при $\cos\varphi = 1$. Наприклад, якщо **cos φ** деякого пристрою дорівнює **0,5**, то це означає, що даний пристрій споживає з кола потужність ***IU***, а використовує лише **0,5** цієї потужності.

Тобто буде мати місце неповне використання установленої потужності генераторів, трансформаторів, а також електричних мереж. Тому дуже важливим стає питання підвищення коефіцієнта потужності.

Проте **cos φ = 1** лише при активному навантаженні. З іншого боку, якщо приймач працює з постійною активною потужністю при незмінній напрузі, але при різних **cos φ** , то його струм зі зменшенням **cos φ** збільшується і нагріває обмотку генератора і проводів, що приводе до збільшення втрат потужності, енергії і ***зменшення ККД***. Так, наприклад, втрати енергії у проводах в цьому випадку складаються з потрібних втрат на передачу активного струму і безкорисних втрат при передачі реактивного струму:

$$P = I^2 \cdot R_{ПР} = I^2_A \cdot R_{ПР} + I^2_P \cdot R_{ПР}. \qquad (2.32)$$

Таким чином, низький коефіцієнт потужності, з одного боку, не дозволяє повністю використовувати встановлену потужність генераторів, а з іншого боку, викликає збільшення втрат енергії. Тому при індуктивному чи ємнісному навантаженні приймають заходи по збільшенню **cos φ** установки до значень близьких до одиниці.

2.9. Контрольні запитання з теми 2

1. Основні параметри змінного сінусоїдального струму.
2. Зображення сінусоїдальних величин.
3. Пояснити зображення сінусоїдальної величини на круговій діаграмі.
4. Елементи кіл змінного струму.
5. Закони Ома і Кірхгофа для змінного струму.
6. Як визначають напруги на елементах кола змінного струму з послідовним з'єднанням R, L, C.
7. Пояснити векторну діаграму напруг.
8. Дати характеристику резонансу напруг.
9. Потужність в колах змінного струму**.**
10. Дати визначення поняттям активного та реактивного опорів і наведіть приклад трикутника опорів.
11. Дати визначення поняття резонансу напруг.
12. За яких умов відбувається резонанс напруг і зміною яких величин його можна досягти?
13. Як застосовується резонанс напруг і яка з ним пов'язана небезпека?
14. Визначте поняття активної реактивної та повної потужностей.
15. В яких одиницях їх вимірюють?