

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. Електричні кола і їхні елементи.
2. Основні закони електричних кіл.
3. Вольтамперні характеристики (ВАХ).
4. Потужність електричного кола. Баланс.
5. Режими роботи елементів електричного кола.

1. Електричні кола і їхні елементи

Електричним струмом називається спрямоване переміщення зарядів. Величина, що характеризує електричний струм, називається силою струму, чи просто струмом.

Під силою струму розуміють кількість електронів, що проходить через поперечний переріз провідника в одиницю часу.

$$I = \frac{Q}{t},$$

де Q – кількість електронів, що проходить через поперечний переріз провідника за час t .

Щоб підтримувати електричний струм протягом тривалого часу, необхідно створити круговорот зарядів, при якому вони рухалися б по замкнутому колу. Для цього необхідно протягом усього часу виконувати роботу з поділу зарядів, підтримуючи надлишок електронів в одному місці й недолік – в іншому.

Пристрої, що виконують роботу з поділу зарядів, називаються джерелами струму (ЕРС).

Джерела здійснюють перетворення різних видів енергії в електричну енергію. Наприклад, генератори перетворюють механічну енергію в електричну, акумулятори – хімічну, термогенератори – теплову.

Джерело струму характеризується величиною й напрямком електрорушійної сили (ЕРС) і величиною внутрішнього опору.

ЕРС джерела визначається по формулі

$$E = \frac{A}{Q},$$

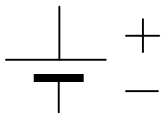
де A – робота, виконувана в джерелі в процесі поділу зарядів;

Q – величина заряду (кількість електрики, переміщеного під час поділу).

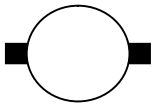
Пристрої й прилади, у яких створюють електричний струм, щоб мати той чи інший ефект, називаються приймачами.

Приймачі – пристрої, що перетворюють електричну енергію в інші види енергії. Так, електродвигуни перетворюють електричну енергію в механічну, електронагрівальні прилади – у теплову.

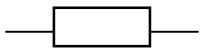
Таким чином, основними елементами електричного кола є джерела й приймачі (споживачі) електричної енергії, з'єднані дротом.



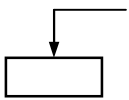
Акумуляторний чи гальванічний



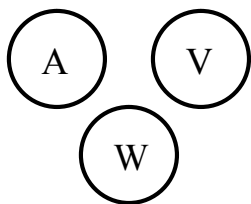
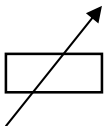
Ротор (якір) генератора чи двигуна постійного струму



Резистор незмінний



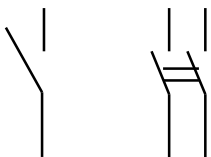
Резистор змінний



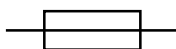
Електровимірювальні прилади
(амперметр, вольтметр, ватметр)



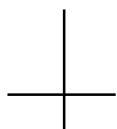
Лампи освітлювальні



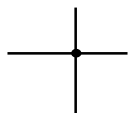
Вимикачі однополюсний і двополюсний



Резистор плавкий



Два нез'єднаних провідника



Два пересічних з'єднаних провідника

Рис.1. Умовні позначки деяких елементів електричних кіл

2. Основні закони електричних кіл

2.1. Закон Ома

У середині ХІХ століття німецький вчений Ом обґрунтував теоретично і підтвердив експериментально закон, що встановлює зв'язок між силою струму, напругою й опором.

За законом Ома, сила струму в замкнутому колі прямо пропорційний напрузі на кінцях цього кола і оберненопропорційна його опору, тобто

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

На рис.2 наведене найпростіше електричне коло постійного струму, що містить джерело електроенергії з ЕРС - E і внутрішнім опором R_0 і приймач – резистор з опором R , з'єднані між собою. Коло, що складається з приймача і з'єднаних проводів, називається зовнішнім. Джерело електричної енергії – внутрішня частина кола. Струм у зовнішньому колі спрямований від більшого потенціалу Φ до меншого, у внутрішньому – навпаки.

Співвідношення між ЕРС, опором і струмом у замкнутому колі визначається законом Ома

$$I = \frac{E}{R + R_0},$$

де I – сила струму в колі, А;
 E – величина ЕРС, У;
 R – опір резистора, Ом;
 R_0 – внутрішній опір джерела, Ом.

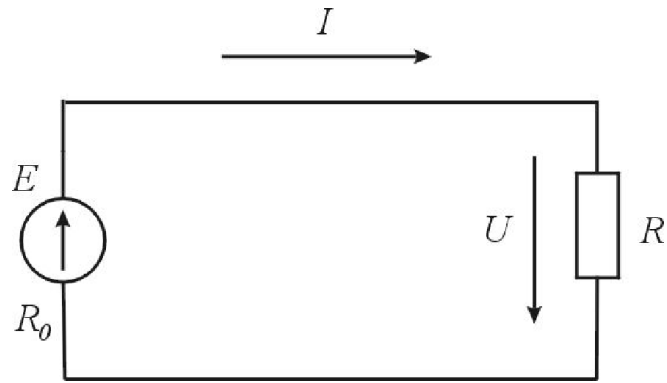


Рис.2. Найпростіше електричне коло постійного струму

Напруга на затискачах джерела, тобто на приймачі U , відрізняється від ЕРС на величину спадання напруги у внутрішньому опорі джерела ΔU

$$U = E - \Delta U = E - IR_0 ,$$

де $\Delta U = IR_0$ – спадання напруги на внутрішньому опорі джерела.

Розглянемо закон Ома для кола, що не містять ЕРС, і для кола, що містить ЕРС різних напрямків.

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \varphi_b + IR \\ U_{ab} &= \varphi_a - \varphi_b = \varphi_b + IR - \varphi_b = IR \end{aligned}$$

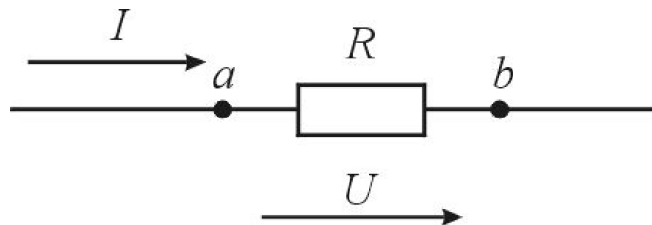


Рис.3. Ділянка кола, не утримуюча ЕРС

Закон Ома в цьому випадку має вигляд

$$I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R} .$$

На рис.4 наведено коло, у якому напрямок ЕРС збігається з напрямком струму.

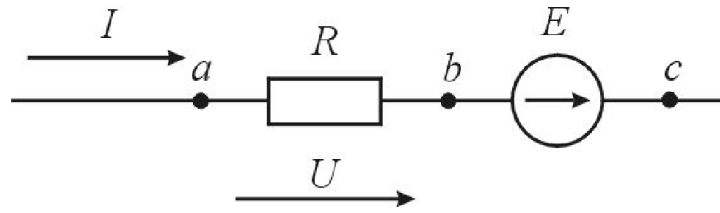


Рис.4. Коло, у якому напрямок ЕРС збігається з напрямком струму

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c; \quad \varphi_a = \varphi_b + IR; \quad \varphi_b = \varphi_c - E.$$

Тоді

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = \varphi_b + IR - \varphi_c = \varphi_c - E + IR - \varphi_c = IR - E.$$

Закон Ома

$$I = \frac{U_{ac} + E}{R}.$$

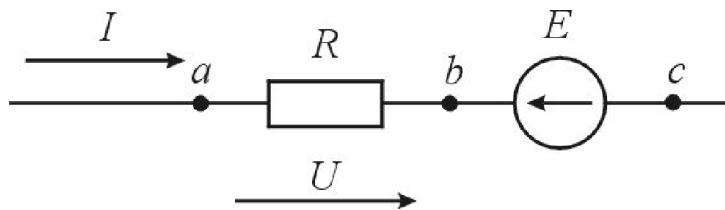


Рис.5. Коло, у якому ЕРС спрямована проти напрямку струму

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c; \quad \varphi_a = \varphi_b + IR; \quad \varphi_b = \varphi_c + E.$$

Тоді

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = \varphi_b + IR - \varphi_c = \varphi_c + E + IR - \varphi_c = IR + E.$$

Закон Ома

$$I = \frac{U_{ac} - E}{R}.$$

2.2. Перший закон Кірхгофа

Вузловою точкою (вузлом) електричного кола називається місце з'єднання трьох і більше проводів. У вузлі електричного кола не можуть

накопичуватися електричні заряди. Тому електричні заряди, що приходять до вузла в одиницю часу, дорівнюють зарядам, що ідуть за той же час. Виходячи з цього, формулюється перший закон Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0.$$

При цьому струми, що надходять до вузла, вважаються позитивними, а що йдуть – негативними. Для вузла на рис.6

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

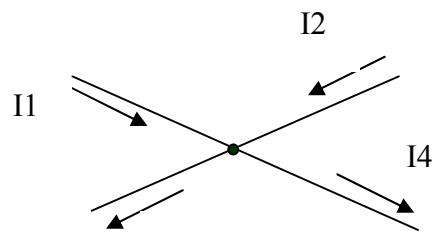


Рис.6. Схема вузла

2.3. Другий закон Кірхгофа

У замкнутому контурі електричного кола алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі падінь напруг на окремих ділянках цього контуру

$$\sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^m I_i R_i.$$

При складанні рівняння вибирають напрямок обходу контуру і довільно задають напрямок струмів.

Складемо рівняння для схеми рис.7. Вибираємо напрямок обходу кола по годинниковій стрілці. Напрямок струму вибираємо так, щоб він співпадав з напрямком ЕРС E_1 .

Розглянемо електричне коло на рис.7, його елементи, а також напрямки всіх діючих ЕРС та струмів.

Тоді рівняння має вигляд

$$E_1 - E_2 = IR_{01} + IR_1 + IR_{02} + IR_2 = I(R_{01} + R_1 + R_{02} + R_2).$$

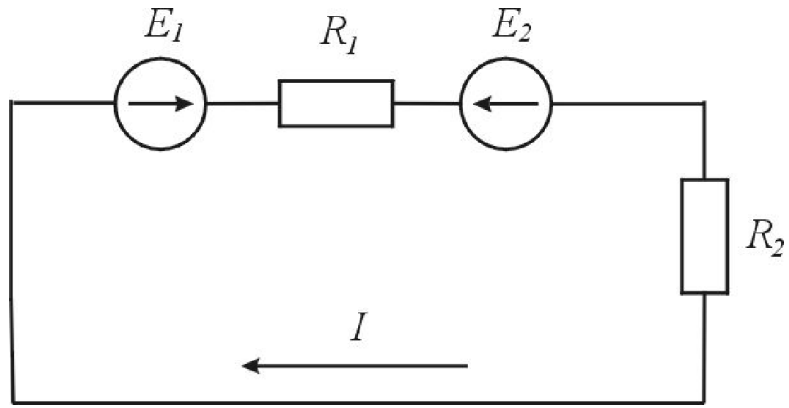


Рис.7. Електричний контур

3. Вольтамперні характеристики (ВАХ).

Залежність струму, що протікає по опору, від напруги на цьому опорі називається вольтамперною характеристикою. Вольтамперні характеристики зображують графічно. При цьому по осі абсцис відкладається напруга, а по осі ординат – струм.

Розрізняють два принципово відмінних типи ВАХ. У першому з них ВАХ являє собою пряму лінію (рис.8,а), у другому – деяку криву лінію (рис.8,б).

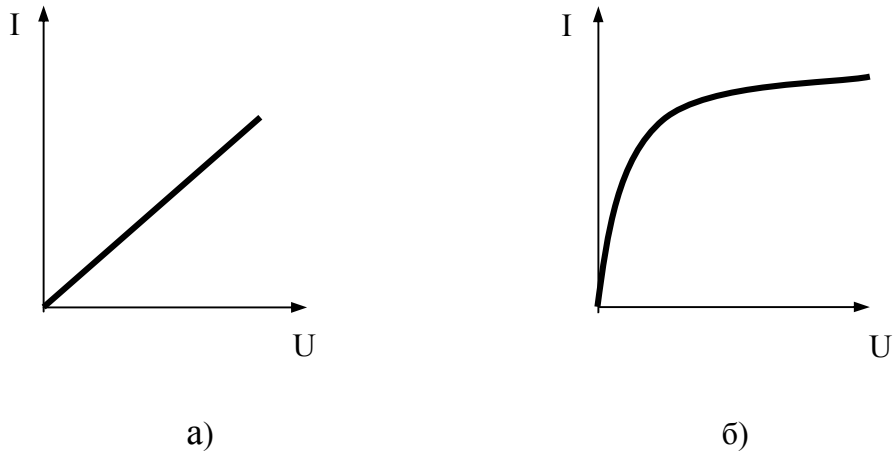


Рис.8. Типи ВАХ

Опір, ВАХ якого не є прямими лініями (тобто нелінійні), називають нелінійними опорами, а електричні кола з вхідними в них нелінійними опорами називають нелінійними електричними колами.

4. Потужність електричного кола. Баланс потужностей

Потужність (робота в одиницю часу) визначається залежністю

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UIt}{t} = UI,$$

(1кВт·год=3600000Дж; 1Вт·с=1Дж; 1Вт·год=3600Вт·с=3600Дж),

де U – напруга, I – струм, P – потужність.

Для кола, що містить резистор

$$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

У будь-якому електричному колі повинен дотримуватися енергетичний баланс – баланс потужності. Відповідно до закону збереження енергії алгебраїчна сума потужностей, вироблюваних усіма джерелами електричної енергії в колі, дорівнює арифметичній сумі потужностей, споживаних усіма приймачами, і потужностей, що знищуються на внутрішніх опорах джерел

$$\sum P_{\text{в}} = \sum P_{\text{п}}.$$

Для схеми на рис.7 баланс потужностей має вигляд

$$E_1I - E_2I = I^2R_{01} + I^2R_1 + I^2R_{02} + I^2R_2 = I^2(R_{01} + R_1 + R_{02} + R_2).$$

Потужність джерела потрібно вважати позитивною, якщо позитивний напрямок струму I збігається з напрямком дії ЕРС. У протилежному випадку потужність вважається негативною і записується в рівняння зі знаком мінус. Наприклад, акумуляторні батареї працюють або в режимі розряду (напрямок струму збігається з напрямком ЕРС) або в режимі заряду (напрямку E і I не збігаються). Також як приклад можна привести роботу електричних машин, що є оборотними. Якщо напрямок струму електричної машини збігається з напрямком її ЕРС – машина працює в режимі генератора (джерела), а якщо не збігається – то в режимі двигуна (приймача електричної енергії).

5. Режими роботи елементів електричного кола

Найбільш характерними є наступні режими роботи:

- номінальний;
- погоджений;
- холостого ходу (ХХ);
- короткого замикання (КЗ).

Номінальним називається режим, при якому даний елемент електричного кола працює зі значеннями різних величин (струму, напруги і т.д.), на які він розрахований заводом-виготовлювачем і які називаються його номінальними (чи технічними) даними. Номінальні дані вказуються в довідковій літературі, технічній документації і на самому елементі.

Для різних елементів електричного кола вказуються різні номінальні дані.

З урахуванням номінальних напруг і струмів джерел і приймачів виробляється вибір проводів і інших елементів електричних кіл.

Погодженим називається режим, при якому потужність, що віддається джерелом чи споживана приймачем, досягає максимального значення. Це можливо при визначеному співвідношенні (узгодженні) параметрів електричного кола, звідки і випливає назва даного режиму.

Під режимом холостого ходу розуміється такий режим, при якому приймач відключений від джерела. При цьому джерело не віддає енергію в зовнішнє коло, а приймач не споживає її. Режимом ХХ двигунів вважається режим, що виникає при роботі двигунів без механічного навантаження на валу.

Режимом короткого замикання називається режим, що виникає при з'єднанні між собою виводів джерела, чи приймача сполучних проводів, а також інших елементів електричного кола, між якими мається напруга. При цьому опір у місці з'єднання виявляється практично рівним нулю.

Режим КЗ є наслідком виходу з ладу ізоляції, обриву проводів, поломки деталей і т.д. При КЗ можуть виникнути неприпустимо великі струми, електрична дуга, можливо різке зниження напруги. Тому режим КЗ розглядають як аварійний.

Лекція №2

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

За допомогою закону Ома і двох законів Кірхгофа можна розрахувати режим роботи електричного кола будь-якої складності. Загальною задачею

розрахунку є визначення струмів у всіх колах при заданих параметрах елементів кола і відомої конфігурації кола.

Методи розрахунку електричного кола:

1. Метод еквівалентних перетворень;
2. Метод законів Кірхгофа;
3. Метод двох вузлів;
4. Метод контурних струмів;
5. Метод накладення (суперпозиції);
6. Метод еквівалентного генератора (активного двухполюсника).

1. Метод еквівалентних перетворень

Багато електричних кіл мають лише одне джерело енергії і те чи інше число пасивних (резистивних) елементів, з'єднаних між собою послідовно чи паралельно. Розрахунок таких кіл здійснюється шляхом заміни окремих ділянок кола, а потім усього кола одним елементом з еквівалентним опором і наступного переходу в процесі розрахунку до заданого кола.

1.1. Послідовне з'єднання резистивних елементів

Послідовним називається таке з'єднання елементів, коли умовний кінець першого елемента з'єднується з умовним початком другого, кінець другого – з початком третього і т.д. (рис.9).

Характерним для послідовного з'єднання є той самий струм у всіх елементах.

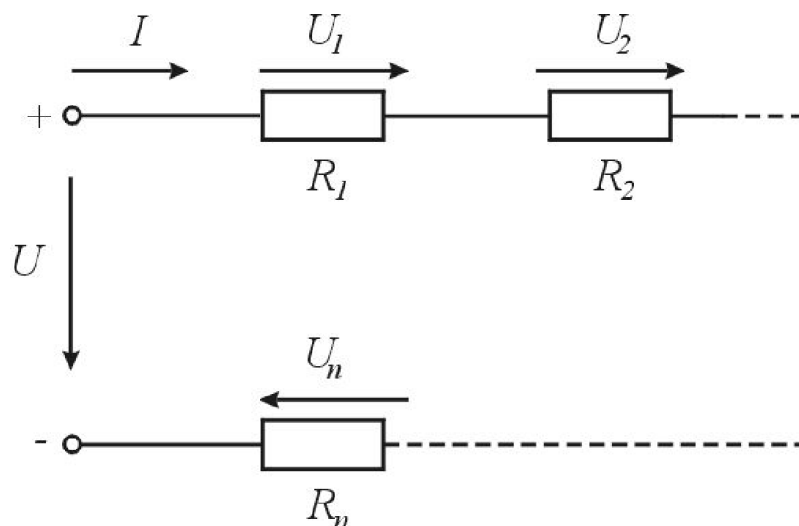


Рис.9. Послідовне з'єднання резистивних елементів

При послідовному з'єднанні n резистивних елементів струм у колі, напруги на елементах і споживані ними потужності визначаються наступними співвідношеннями

$$R_{\text{э}} = \sum_{k=1}^n R_k; \quad I = \frac{U}{\sum_{k=1}^n R_k} = \frac{U}{R_{\text{э}}}; \quad U_k = IR_k; \quad P_k = IU_k = I^2 R_k,$$

де $k=1,2,\dots, n$ – номер елемента.

Приймачі електричної енергії послідовно, як правило, не з'єднуються, тому що при цьому потрібне узгодження номінальних даних приймачів, виключається можливість незалежного їхнього відключення, а при виході з ладу одного з приймачів відключаються також інші приймачі.

1.2. Рівнобіжне з'єднання резистивних елементів.

Рівнобіжним називається таке з'єднання елементів, при якому з'єднуються між собою як умовні початки всіх елементів, так і їхні умовні кінці (рис.10).

Характерним для рівнобіжного з'єднання є однакова напруга на виводах всіх елементів.

Струми і потужності паралельно з'єднаних гілок при $U = \text{const}$ не залежать один від одного і визначаються по формулах

$$\frac{1}{R_{\text{э}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}; \quad I_k = Ug_k = \frac{U}{R_k};$$

$$P_k = UI_k = \frac{U^2}{R_k} = U^2 g_k = I_k^2 R_k.$$

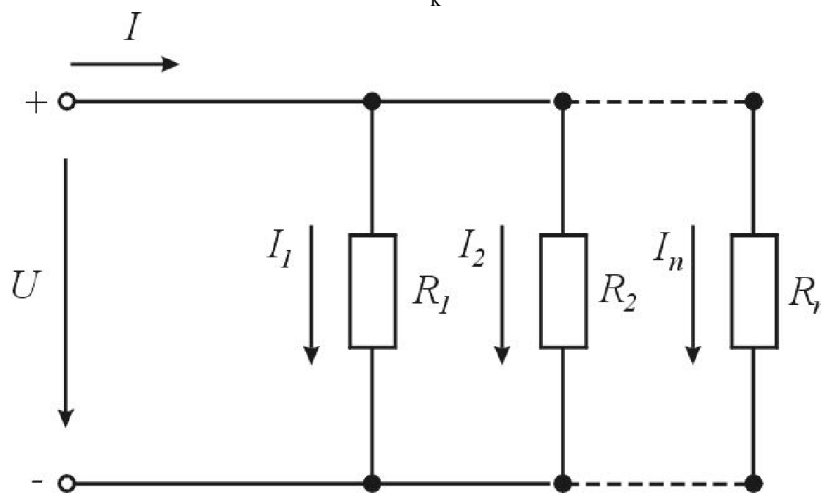


Рис.10. Рівнобіжне з'єднання резистивних елементів

Ток і потужність усього кола

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = \frac{U}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}} = \frac{U}{\sum_{k=1}^n g_k} = U g_e = \frac{U}{R_e},$$

$$P = \sum_{k=1}^n P_k = UI = U \sum_{k=1}^n I_k = U^2 g_e = \frac{U^2}{R_e} = I^2 R_e,$$

де $g_e = \sum_{k=1}^n g_k$, - еквівалентна провідність; $R_e = \frac{1}{g_e}$ - еквівалентний опір.

При збільшенні числа паралельно з'єднаних гілок еквівалентна провідність електричного кола зростає, а еквівалентний опір відповідно зменшується. Це призводить до збільшення струму I . Якщо напруга залишається постійною, то збільшується також загальна потужність P ; струми і потужності раніше включених гілок не змінюються.

1.3. Змішане з'єднання резистивних елементів

При наявності у колі тільки одного джерела ЕРС зовнішню стосовно джерела частину електричного кола можна в більшості випадків розглядати як змішане (послідовно-рівнобіжне) з'єднання резистивних елементів. У схемі (рис.11) R_2, R_3, R_4 підключені паралельно.

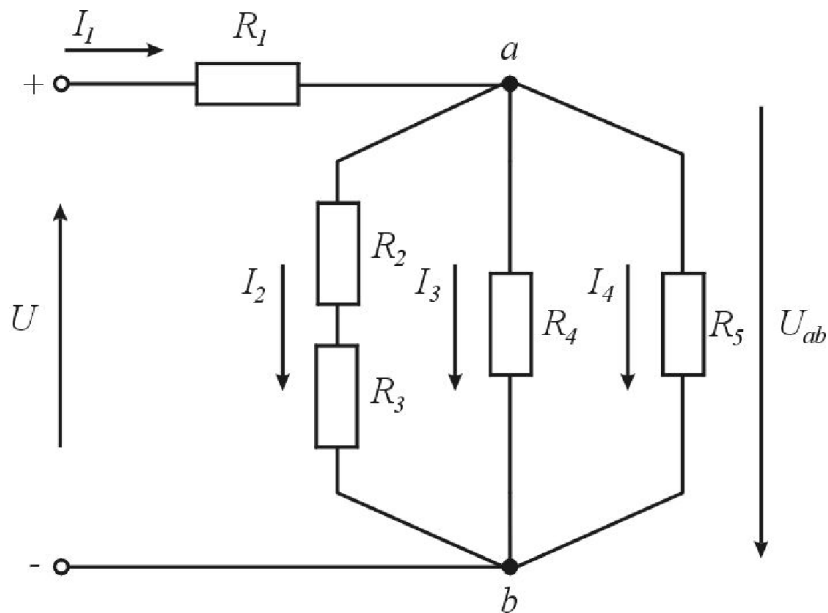


Рис.11. Змішане з'єднання резистивних елементів

При рівнобіжному підключенні резистивних елементів еквівалентна провідність дорівнює сумі провідностей кожної ланки

$$g_{e_{ab}} = g_2 + g_3 + g_4;$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2 + R_3}; \quad g_3 = \frac{1}{R_4}; \quad g_4 = \frac{1}{R_5}; \quad R_{e_{ab}} = \frac{1}{g_{e_{ab}}};$$

При послідовному з'єднанні резистивних елементів ланки еквівалентний опір дорівнює сумі опорів цих елементів

$$R_e = R_1 + R_{e_{ab}}.$$

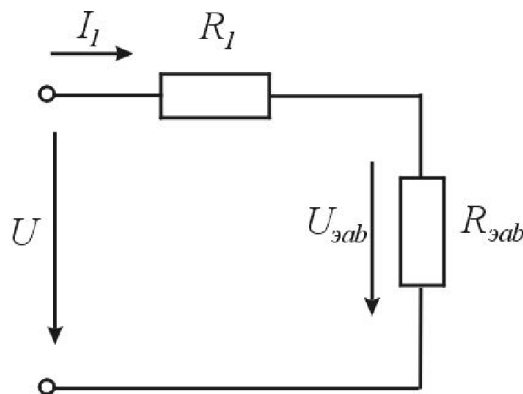


Рис.12. Коло з послідовним з'єднанням резистивних елементів

Струм у нерозгалуженій частині кола дорівнює

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_{e_{ab}}}.$$

Щоб обчислити струми в гілках кола, потрібно визначити U_{ab}

$$U_{ab} = I_1 R_{e_{ab}}.$$

Потім за законом Ома обчислимо струми в гілках

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2 + R_3}; \quad I_3 = \frac{U_{ab}}{R_4}; \quad I_4 = \frac{U_{ab}}{R_5}.$$

1.4. З'єднання резистивних елементів трикутником

Під з'єднанням трикутником розуміється з'єднання, наведене на (рис.13,а.)

Для спрощення розрахунку й аналізу деяких електричних кіл, у яких резистивні елементи з'єднані трикутником, доцільно замінити їх резистивними елементами, з'єднаними зіркою (рис.13,б).

Прикладом електричного кола, у якому резистивні елементи з'єднані трикутником, є мостові кола (рис.14,а).

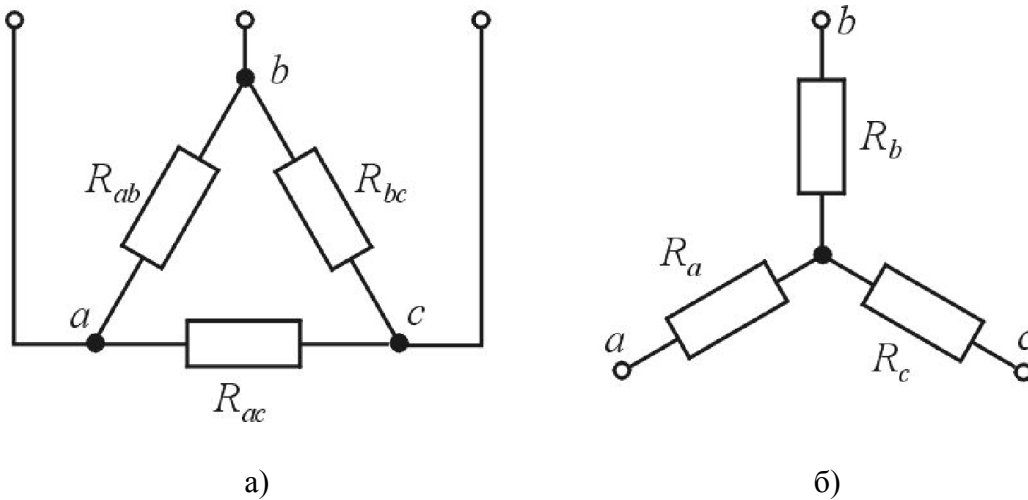


Рис.13. З'єднання резистивних елементів: а) трикутником; б) зіркою

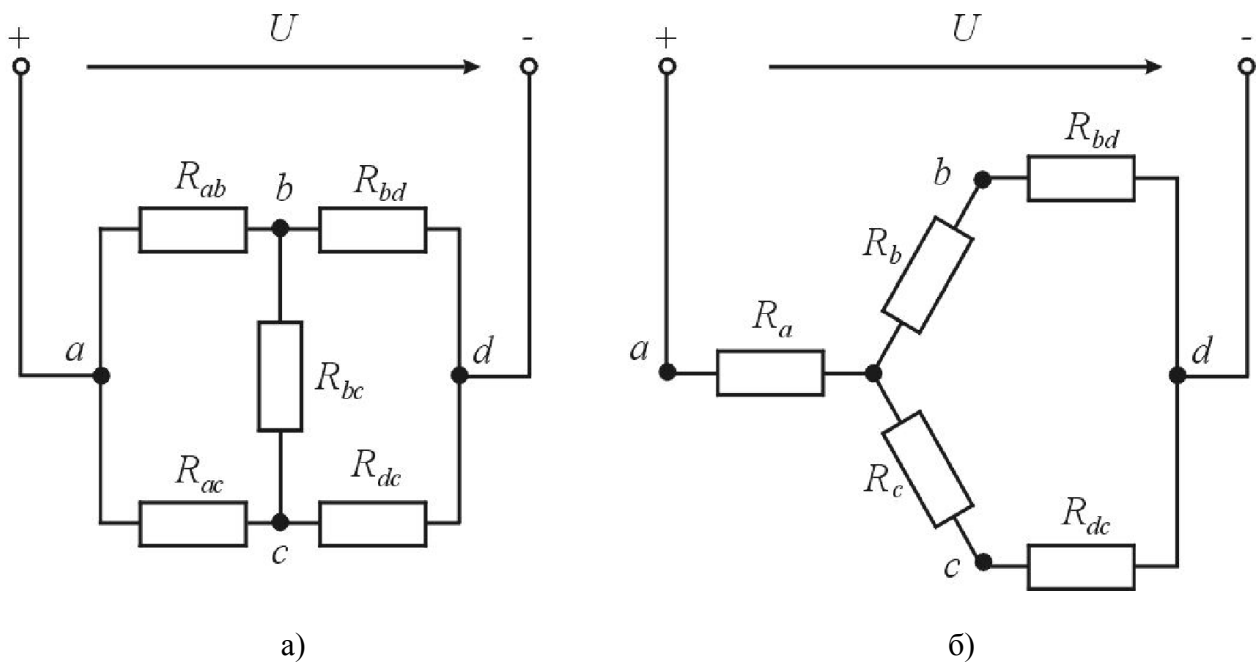


Рис.14. Мостові кола: а) по схемі трикутника; б) по схемі зірка

Як видно, у мостового кола резистивні елементи утворюють два суміжних трикутники, і немає жодного елемента, що був би з'єднаний з іншим послідовно чи паралельно. Однак якщо замінити, наприклад, резистивні елементи R_{ab}, R_{bc}, R_{ca} , з'єднані трикутником, еквівалентними елементами R_a, R_b, R_c , з'єднаними зіркою (рис.14,б), то одержимо коло зі змішаним з'єднанням резистивних елементів, методика розрахунку якого була розглянута вище.

Заміна трикутника резистивних елементів еквівалентною зіркою повинна виконуватися таким чином, щоб після заміни струми в іншій частині кола, а також напруги між точками ab, bc, ca залишилися без зміни.

За допомогою законів Кірхгофа можна одержати наступні формули для визначення опорів еквівалентної зірки:

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; \quad R_b = \frac{R_{ab}R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; \quad R_c = \frac{R_{ca}R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}.$$

Іноді виявляється доцільним замінити резистивні елементи, з'єднані зіркою, еквівалентним трикутником. Формули можна знайти в підручниках.

2. Метод законів Кірхгофа

Розглянемо приклад розрахунку схеми по методу законів Кірхгофа.

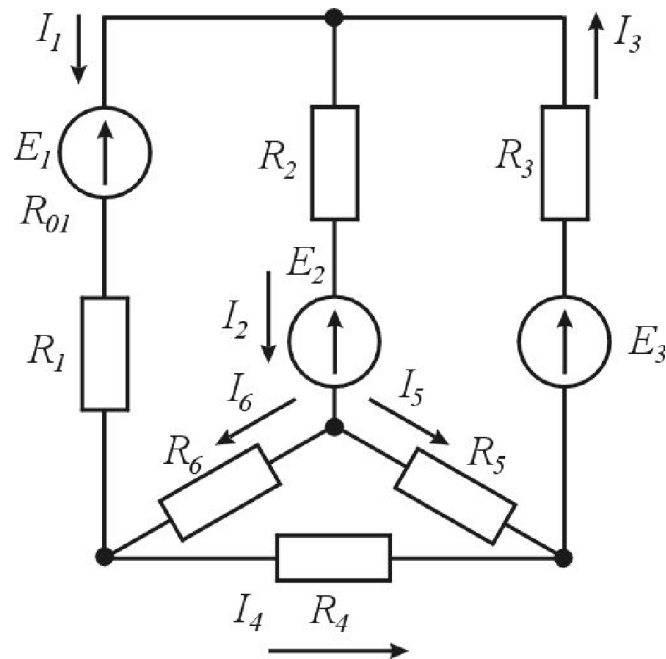


Рис.15. Електрична схема для розрахунку

Дано параметри елементів кола.

Знайти струми у всіх гілках кола.

Складемо систему рівнянь, користаючись першим і другим законами Кірхгофа.

По першому закону Кірхгофа складається число незалежних рівнянь на 1 менше загального числа вузлів. У даному випадку складається 3 рівняння. ($n = m - 1$, n - число рівнянь, m - число вузлів)

При складанні рівнянь на підставі другого закону Кірхгофа варто вибирати незалежні контури, тобто такі, котрі містять хоча б одну ланку, що не ввійшла в контури, для яких уже складені рівняння. Число рівнянь, складених по другому законі Кірхгофа, дорівнює $k = x - (m - 1)$, де k - число рівнянь, по другому законі Кірхгофа; x - число рівнянь системи (число гілок).

Таким чином, складемо систему з 6 рівнянь з 6 невідомими.

$$\text{Для вузла 'a': } -I_1 - I_2 + I_3 = 0;$$

$$\text{Для вузла 'b': } I_2 - I_5 - I_6 = 0;$$

$$\text{Для вузла 'c': } I_1 - I_4 + I_6 = 0;$$

$$\text{Контур 'abca': } E_1 - E_2 = -I_1(R_0 + R_1) + I_2(R_{02} + R_2) + I_6R_6;$$

$$\text{Контур 'adba': } E_2 - E_3 = -I_2(R_{02} + R_2) + I_3R_3 - I_5R_5;$$

$$\text{Контур 'bdcb': } 0 = -I_4R_4 + I_5R_5 + I_6R_6.$$

Вирішивши цю систему рівнянь, можна знайти струми $I_1 - I_6$. Але рішення систем рівнянь вимагає значних витрат часу. Тому при можливості розраховують кола більш простими методами. Проте, усі ці методи ґрунтуються на застосуванні законів Ома і Кірхгофа.

3. Метод контурних струмів

Цей метод може бути застосований для розрахунку будь-якого лінійного кола. Його застосування дозволяє зменшити число спільно розв'язуваних рівнянь у порівнянні з числом рівнянь, що складаються за законами Кірхгофа.

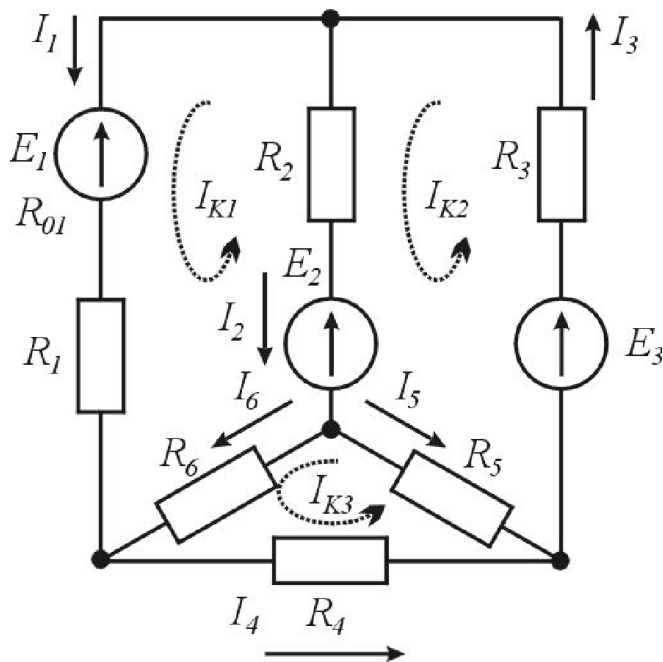
Складаємо систему рівнянь щодо контурних струмів I_{k1} , I_{k2} , I_{k3} по другому законі Кірхгофа. Контурний струм – той самий струм у всіх галузях відповідного контуру.

Приймаємо умовно напрямок контурних струмів по годинниковій стрілці. Тоді отримаємо

$$E_1 - E_2 = I_{k1}(R_1 + R_{01} + R_2 + R_{02} + R_6) - I_{k2}(R_2 + R_{02}) - I_{k3}R_6;$$

$$E_2 - E_3 = -I_{k1}(R_2 + R_{02}) + I_{k2}(R_2 + R_{02} + R_3 + R_5) - I_{k3}R_5;$$

$$0 = -I_{k1}R_6 - I_{k2}R_5 + I_{k3}(R_4 + R_5 + R_6).$$



$$E_1 = 10\text{В}; E_2 = 6\text{В}; E_3 = 24\text{В};$$

$$R_{01} = 0,8\text{Ом}; R_{02} = 0,3\text{Ом};$$

$$R_1 = 3,5\text{Ом}; R_{02} = 0,3\text{Ом};$$

$$R_4 = 6\text{Ом}; R_5 = 3\text{Ом}; R_6 = 1\text{Ом};$$

$$I_{\text{и}} - ? \quad P_{\text{и}} - ? \quad P_{\text{н}} = ?$$

Рис.16. Електрична схема для розрахунку.

Підставляємо в рівняння відомі значення ЕРС і опорів.

$$4 = 10,6I_{k1} - 5,3I_{k2} - 1I_{k3};$$

$$-18 = -5,3I_{k1} + 14,3I_{k2} - 3I_{k3};$$

$$0 = -11I_{k1} - 3I_{k2} + 10I_{k3}.$$

Вирішимо цю систему методом визначників. Представимо цю систему в загальному вигляді.

$$b_1 = a_{11}I_{k1} + a_{12}I_{k2} + a_{13}I_{k3};$$

$$b_2 = a_{21}I_{k1} + a_{22}I_{k2} + a_{23}I_{k3};$$

$$b_3 = a_{31}I_{k1} + a_{32}I_{k2} + a_{33}I_{k3}.$$

Тоді головний визначник обчислюється в такий спосіб

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} =$$

$$= (-1)^{i+j} \sum_j a_{ij} \cdot \Delta_{ij} = a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{32}a_{23}) - a_{12}(a_{21}a_{33} - a_{31}a_{23}) + a_{13}(a_{21}a_{32} - a_{31}a_{22}),$$

де i - номер рядка, j - номер стовпця.

Варто зазначити, що всі члени матриці записуються з урахуванням знаків.

Для розв'язуваного приклада одержимо головний визначник

$$\Delta = \begin{vmatrix} 10,6 & 5,3 & 1 \\ -5,3 & 14,3 & 3 \\ -1 & -3 & 10 \end{vmatrix} =$$

$$= 10,6[14,3 \cdot 10 - (-3)] - (-5,3)[(-5,3) \cdot 10 - (-1) \cdot (-3)] + (-1)[(-5,3 \cdot 10) - (-1)(-3)] = 1093,4$$

Перший визначник

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Для прикладу

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 4 & -5,3 & -1 \\ -18 & 14,3 & -3 \\ 0 & -3 & 10 \end{vmatrix} = -472$$

Другий визначник

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & a_{13} \\ a_{21} & b_2 & a_{23} \\ a_{31} & b_3 & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 10,6 & 4 & -1 \\ -5,3 & 18 & 3 \\ -1 & 0 & 10 \end{vmatrix} = -1666$$

Третій визначник

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 10,6 & 5,3 & 4 \\ -5,3 & 14,3 & 18 \\ -1 & -3 & 0 \end{vmatrix} = -547$$

Знаючи визначники, можна обчислити значення контурних струмів

$$I_{kl} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = -\frac{472}{1093,4} = -0,4317 \text{ A};$$

$$I_{k2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = -\frac{1666}{1093,4} = -1,5237A ;$$

$$I_{k3} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = -\frac{547}{1093,4} = -0,5003A .$$

Знак '-' перед значенням струму означає, що струм у контурі має протилежний напрямок.

Поставимо дійсні напрямки контурних струмів.

Тепер визначаємо значення струмів у гілках кола. Струм I_1 дорівнює струму I_{k1} , спрямованому у тому ж напрямку. Аналогічно – для струмів у всіх зовнішніх колах.

$$I_1 = I_{k1} = 0,4317A ;$$

$$I_3 = I_{k2} = 1,5237A ;$$

$$I_4 = I_{k3} = 0,5003A .$$

Струми в суміжних гілках визначаються як різниця значень контурних струмів, що протікають у цих гілках. При цьому напрямок струму в цій ланці збігається з напрямком більшого по величині контурного струму. Отже

$$I_2 = I_{k2} - I_{k1} = 1,5237 - 0,4317 = 1,092A ;$$

$$I_5 = I_{k2} - I_{k3} = 1,5237 - 0,5003 = 1,0234A ;$$

$$I_6 = I_{k3} - I_{k1} = 0,5003 - 0,4317 = 0,0686A .$$

Тепер ми можемо проставити дійсні напрямки струмів у галузях кола. Для перевірки правильності розрахунку електричного кола складається баланс потужностей. Потужність, генерація джерелами ЕРС, повинна дорівнювати потужності, споживаної споживачами кола плюс втрати потужності на внутрішньому опорі джерел ЕРС. Варто враховувати, що якщо струм у ланці збігається з напрямком ЕРС у джерелі, то потужність виробляється джерелом. Якщо не збігається – джерело споживає потужність. Беручи це до уваги, запишемо

$$P_u = E_3 I_3 = 24 \cdot 1,5237 = 36,5685 \text{Вт} .$$

$$P_n = E_1 I_1 + E_2 I_2 + I_1^2 (R_1 + R_{01}) + I_2^2 (R_2 + R_{02}) + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 36,5685 \text{Вт}$$

Баланс потужностей зійшовся, значить коло розраховане вірно. Показання приладу визначаємо по другому законі Кірхгофа.

$$E_3 = U_v + I_5 R_5 \Rightarrow U_v = E_3 - I_5 R_5 = 24 - 1,0234 \cdot 3 = 20,93 \text{В}$$

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

1. Електричні кола синусоїдального струму
2. Форми представлення електричних величин
3. Векторне зображення синусоїдальних величин
4. Представлення синусоїдальних величин комплексними числами

1. Електричні кола синусоїдального струму

Електричні кола, у яких значення й напрямок Е.Р.С., напруга й струми періодично змінюються в часі по синусоїдальному закону, називаються колами синусоїдального струму (чи колами змінного струму). Доцільність застосування енергії перемінного струму замість постійного струму обумовлена багатьма причинами:

1. Джерела енергії перемінного струму – синхронні генератори – дешевше, надійніше і можуть бути виготовлені на дуже великі потужності і більш високі напруги, ніж генератори постійного струму.
2. Енергія змінного струму однієї напруги легко перетвориться в енергію змінного струму іншої (вищої чи нижчої) напруги за допомогою простого, дешевого і надійного апарата – трансформатора, що дуже важливо при передачі енергії на великі відстані.
3. Двигуни змінного струму дешевші і надійніші, ніж двигуни постійного струму.

Генератори електричних станцій змінного струму влаштовані так, що ЕРС, яка виникає в їхніх обмотках, змінюється по синусоїдальному закону. Синусоїдальна ЕРС. у лінійних колах, де містяться резистивні, індуктивні і ємнісні елементи, збуджує струм, що змінюється за законом синуса.

Виникаючі при цьому ЕРС самоіндукції в котушках індуктивності і напруги на конденсаторах також змінюються по синусоїдальному закону, що видно з виразів, наведених нижче

$$e = -L \frac{di}{dt}; \quad i = C \frac{du_c}{dt},$$

так як похідна синусоїдальної функції є функція синусоїдальна.

Напруга на резистивному елементі буде також змінюватися по синусоїдальному закону, тому що

$$U = iR .$$

Доцільність технічного використання синусоїдального струму обумовлена тим, що КПД генераторів, двигунів, трансформаторів і ліній електропередачі при синусоїдальній формі ЕРС напруги й струму виходить найвищим у порівнянні з несинусоїдальним струмом. Важливу роль відіграє і той факт, що розрахунок синусоїдальних кіл значно простіше, ніж розрахунок кіл, де ЕРС, напруга й струм змінюються по несинусоїдальному закону. Розглянемо механізм виникнення й основні співвідношення, характерні для синусоїдальної ЕРС. Для цього зручно використовувати найпростішу модель – рамку, що обертається з постійною кутовою швидкістю ω в рівномірному магнітному полі.

Провідники рамки, переміщаючи в магнітному полі, перетинають його, і в них на підставі закону електромагнітної індукції наводиться ЕРС. Значення ЕРС пропорційне магнітній індукції B , та довжині провідника l і швидкості переміщення провідника відносно V_t

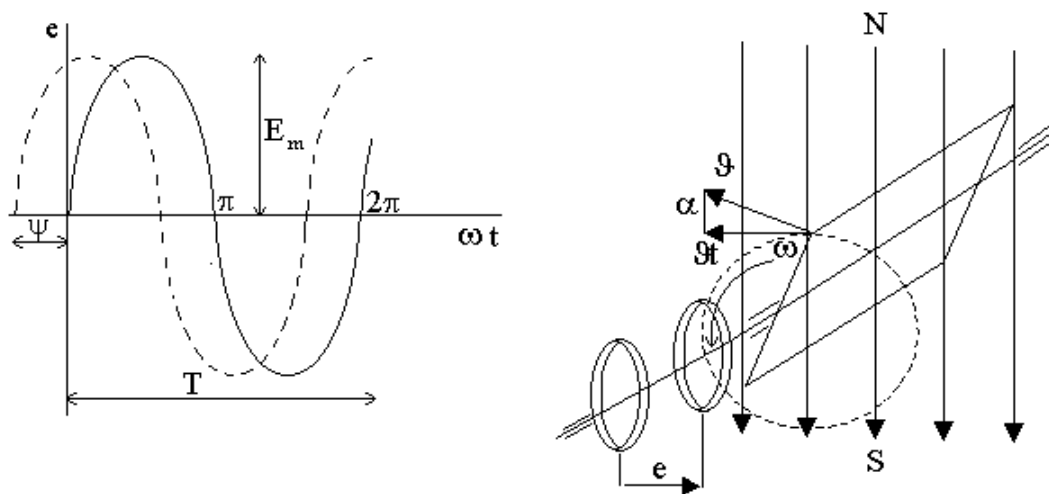


Рис 1. Механізм виникнення синусоїдальної ЕРС

$$e = B l V_t.$$

Виразивши швидкість V через кутову швидкість ω і кут α , одержимо

$$e = B l v \sin \alpha = E_m \sin \alpha.$$

Кут α дорівнює добутку кутової швидкості рамки ω на час t

$$\alpha = \omega t.$$

Таким чином, ЕРС, що виникає в рамці, буде дорівнювати

$$e = E_m \sin \alpha = E_m \sin \omega t.$$

За один поворот рамки відбувається повний цикл зміни ЕРС.
ЕРС

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi),$$

де e – миттєве значення ЕРС;

амплітудне значення ЕРС (у момент часу $\omega t + \varphi = \frac{\pi}{2}$);

$(\omega t + \varphi)$ - фаза;

φ - початкова фаза.

Фаза визначає значення ЕРС у діючий момент часу t , початкова фаза – у момент часу t .

Час одного циклу називається періодом T , а число періодів у секунду – частотою f

$$f = \frac{1}{T} [C^{-1}] = [Гц].$$

Величина $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ в електротехніці називається кутовою частотою і вимірюється в рад/с.

Електрична енергія виробляється синхронними генераторами електричних станцій у виді енергії синусоїдального струму з частотою 50Гц. Вибір частоти промислових установок обумовлений техніко-економічними вимогами. При менших частотах габаритні розміри, маса й вартість трансформаторів і машин вище. Крім того, помітне миготіння світла освітлювальних приладів і т.п. При великих частотах у трансформаторах і машинах збільшуються втрати енергії, підвищується спадання напруги в проводах внаслідок зростання індуктивного опору і т.п.

Однак широко використовуються синусоїдальні струми й інші частоти. Наприклад, у електроакустичних установках частота синусоїдального струму може складати декілька Герц, частота струму електричних печей для виплавки тугоплавких і особливо чистих металів складає 500Гц – 50кГц, у радіотехніці використовуються частоти до 10^{10} Гц.

2. Форми представлення електричних величин

Відомо декілька способів представлення величин, що змінюються по синусоїдальному закону:

1. У вигляді тригонометричних функцій (аналітичний вигляд)

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e);$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i);$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u).$$

Робити розрахунок електричних кіл при такій формі представлення – справа дуже трудомістка, оскільки приходится робити операції над тригонометричними функціями.

2. У вигляді графіків зміни функцій у часі.

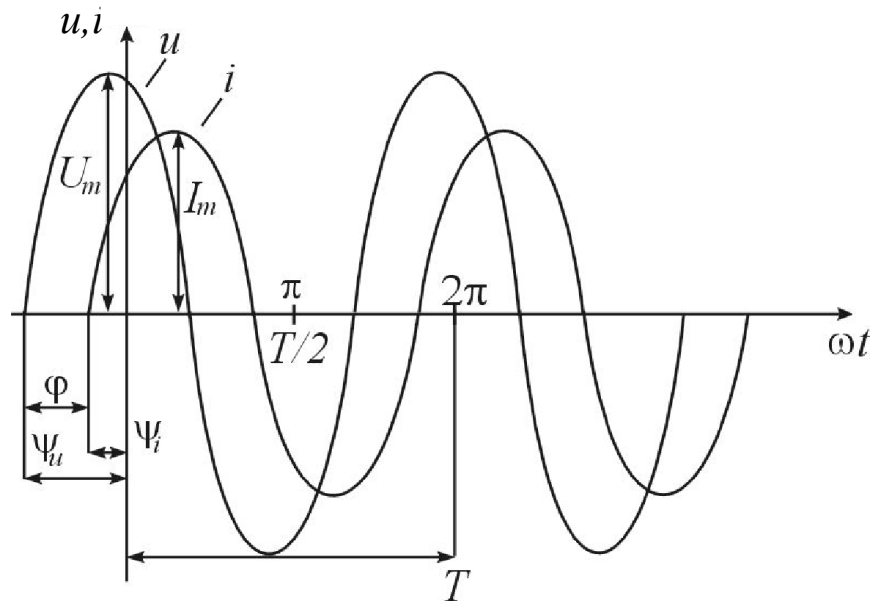


Рис 2. Графік синусоїдальної напруги і струму

Для порівняння двох синусоїдальних величин необхідно знати різницю їхніх початкових фаз.

Якщо на ділянці кола струм i і напруга u мають однакові початкові фази, вважають, що вони збігаються по фазі

$$\psi_u = \psi_i.$$

Якщо графік напруги u на якій-небудь ділянці кола перетинає координату часу t раніше графіка струму i , говорять, що напруга за часом випереджує струм. І навпаки.

На малюнку представлені графіки синусоїдального струму i і синусоїдальної напруги, що зрушені один щодо одного на кут ϕ

$$\phi = \psi_u + \psi_i,$$

де ϕ - зрушення фаз між напругою і струмом.

3. Векторне зображення синусоїдальних величин

Синусоїдальну функцію часу можна зобразити вектором, рівним амплітуді даної функції, що рівномірно обертається з кутовою швидкістю ω . При цьому початкове положення радіус – вектора визначається (для $t = 0$) його початковою фазою Ψ .

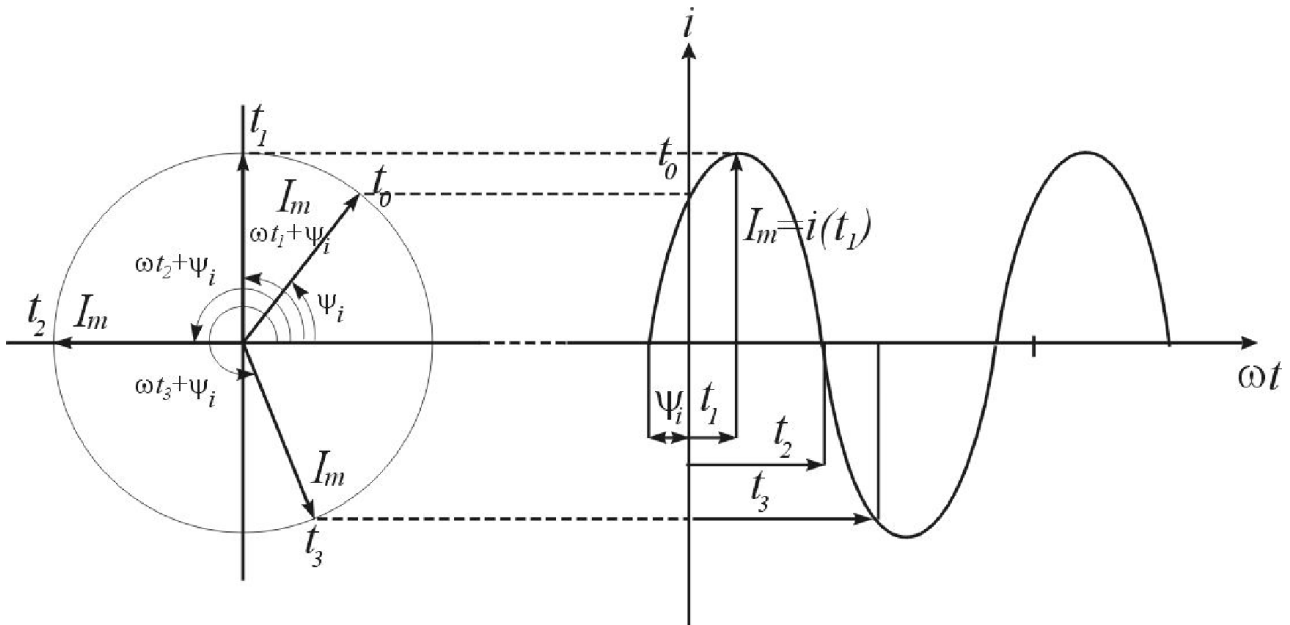


Рис 3. Зображення синусоїдальних величин на круговій діаграмі

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. Якщо обертати вектор проти годинникової стрілки, то в будь-який момент часу він складе з горизонтальною віссю кут, рівний $\omega t + \psi$. Проекція обертаючого вектора на вісь ординат дорівнює миттєвому значенню синусоїдальної величини.

За допомогою векторів можна робити геометричне підсумовування електричних величин. Наприклад

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1);$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2);$$

$$i = i_1 + i_2 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2).$$

Одержимо амплітуду результуючого струму I_m . Сума проекцій струмів I_{1m} і I_{2m} дорівнює проекції результуючого струму I_m

$$i = i_1 + i_2.$$

З кругової діаграми видно, що взаємне розташування векторів I_{1m} , I_{2m} і I в будь-який момент часу залишається незмінним, тому що вони обертаються з постійною кутовою частотою ω . У такий же спосіб можна скласти два чи більше змінюючихся синусоїдальних величин (струмів, напруг, ЕРС).

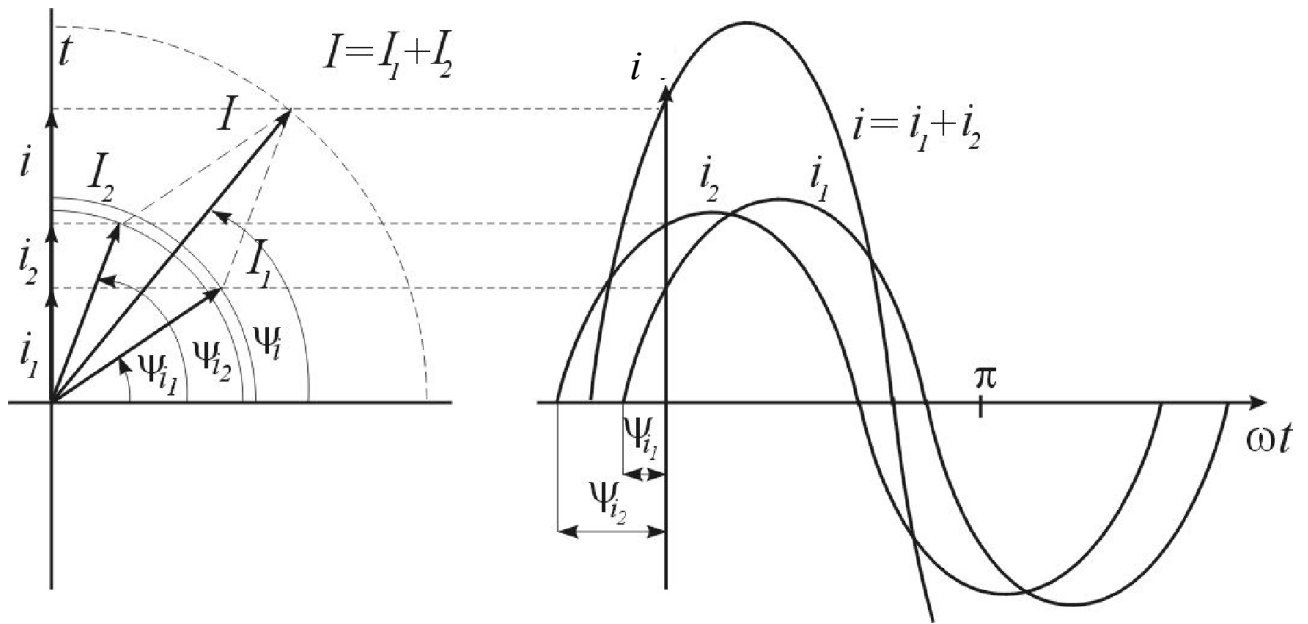


Рис 4. Складання синусоїдальних величин на круговій діаграмі

Сукупність декількох обертових векторів, що відповідають рівнянням електричного кола, називаються векторною діаграмою. Звичайно, векторні діаграми будують не для амплітудних, а для діючих значень. Вектори діючих значень відрізняються від векторів амплітудних значень тільки масштабами, тому що

$$I = I_m / \sqrt{2}.$$

При побудові векторних діаграм зазвичай один з вихідних векторів розташовують на площині довільно, інші ж вектори – під відповідними кутами до вихідного.

4. Представлення синусоїдальних величин комплексними числами

Найбільш простим і зручним для розрахунку складних кіл струму є комплексне представлення синусоїдальних величин.

Щоб представити задану в тригонометричній формі синусоїдальну величину

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

з початковою фазою Ψ комплексним числом, зобразимо її на комплексній площині.

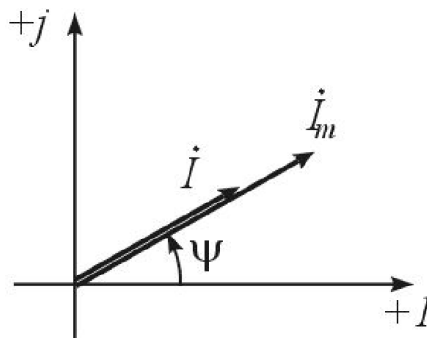


Рис 5. Зображення синусоїдальної величини на комплексній площині

де j -це штучно введена величина $j = \sqrt{-1}$.

З початку координат під кутом Ψ до осі дійсних величин побудуємо вектор, довжина якого в масштабі чисельно дорівнює значенню I_m . Кінець цього вектора знаходиться в точці, який відповідає комплексне число, рівне комплексній амплітуді синусоїдального струму

$$I_m = I_m e^{j\Psi}.$$

В електриці частіше користуються не амплітудним, а діючим значенням електричних величин. Діючим значенням називається такий незмінний у часі струм, при якому виділяється на активному опорі за період та ж кількість енергії, що і при дійсному синусоїдальному струмі, що змінюється. Амплітудне й діюче значення пов'язане співвідношенням

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Вектор на комплексній площині, довжина якого в масштабі дорівнює діючому значенню синусоїдального струму

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = Ie^{j\psi}.$$

Застосовується три форми запису комплексного значення синусоїдальної величини:

1. показова форма

$$I = Ie^{j\psi}.$$

2. тригонометрична форма

$$I = I \cos \psi + jI \sin \psi.$$

3. алгебраїчна форма

$$I = I' + jI'',$$

де $I' = I \cos \psi$ - дійсна складова;

$I'' = I \sin \psi$ - мніма складова комплексного значення синусоїдального струму;

$I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2}$ - модуль комплексного числа;

$\psi = \arctg \frac{I''}{I'}$ - аргумент комплексного числа.

Перехід від показової форми до тригонометричного виконується за допомогою формули Ейлера

$$e^{j\psi} = \cos \psi + j \sin \psi.$$

Комплексне представлення синусоїдальних величин дозволяє застосовувати закони, що використовуються при розрахунку кіл постійного струму, і для розрахунку кіл змінного струму. Це закон Ома, закони Кірхгофа.

Кола синусоїдального струму включають резистивні, індуктивні і ємнісні елементи.

Розглянемо закон Ома для цих елементів кола.

1. Резистивний елемент.

Виберемо позитивний напрямок синусоїдального струму

$$i_R = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

У резистивному елементі з постійним опором R співпадаючим з позитивним напрямком синусоїдальної напруги, прикладеного до елемента.

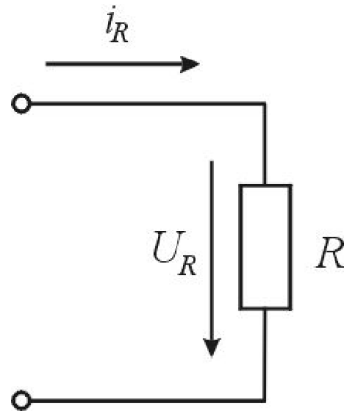


Рис 6. Резистивний елемент

У цьому випадку за законом Ома для миттєвих значень напруги й струму справедливе співвідношення

$$u_R = Ri_R \quad \text{і} \quad u_R = RI_{\text{m}} \sin(\omega t + \psi_i) = U_{\text{m}} \sin(\omega t + \psi_u),$$

де амплітуди зв'язані співвідношенням $U_{\text{m}} = RI_{\text{m}}$, а їхні початкові фази однакові $\psi_u = \psi_i$, тобто на активному опорі струм і напруга збігається по фазі.

У комплексній формі струм і напруга мають вигляд

$$\dot{I}_R = I_R e^{j\psi_i} \quad \text{і} \quad \dot{U}_R = U_R e^{j\psi_u}$$

Векторна діаграма зображена на рис.7.

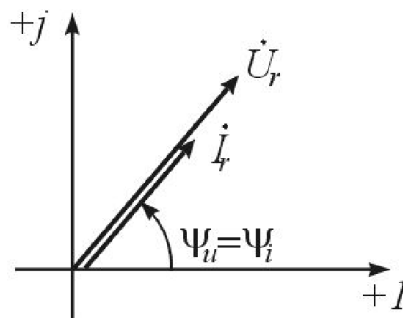


Рис 7. Векторна діаграма для резистивного елемента

Тоді закон Ома в комплексній формі $\dot{U}_R = R\dot{I}_R$.

Як видно, напруга й струм збігаються по фазі.

2. Індуктивний елемент.

Синусоїдальний струм в індуктивному елементі

$$i_L = I_{\text{Lm}} \sin(\omega t + \psi_i).$$

За законом електромагнітної індукції при протіканні струму з'явиться напруга

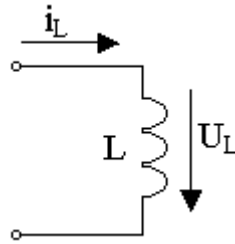


Рис 8. Індуктивний елемент

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = \omega L I_{Lm} \cos(\omega t + \psi_i) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u).$$

Амплітуди напруги і струму зв'язані співвідношенням

$$U_{Lm} = \omega L I_{Lm} ,$$

а їхні початкові фази – співвідношенням $\psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2}$.

Для діючих значень одержимо вирази, розділивши амплітуди на $\sqrt{2}$

$$U_L = \omega L I_L = x_L I_L.$$

Величина $x_L = \omega L$ називається індуктивним опором.

Векторна діаграма в цьому випадку має вигляд

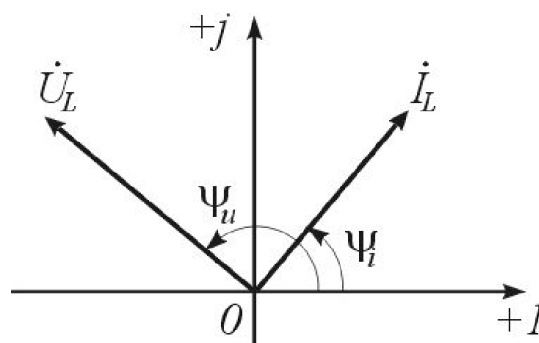


Рис 9. Векторна діаграма для індуктивного елемента

Вектор напруги випереджає вектор струму на кут $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (зсув фаз).

Представимо струм і напругу в комплексній формі

$$\dot{U}_L = I_L e^{j\psi_i} \quad \text{і} \quad \dot{U}_L = U_L e^{j\psi_u}.$$

Закон Ома в комплексній формі

$$\dot{U}_L = \omega L I_L e^{j\psi_u} = \omega L I_L e^{j(\psi_i + \pi/2)} \quad \text{або} \quad \dot{U}_L = j\omega L \dot{I}_L = jx_L \dot{I}_L,$$

де $jx_L = j\omega L$ – опір індуктивного елемента.

3. Ємнісний елемент.

Якщо напруга між виходами ємнісного елемента змінюється по синусоїдальному закону

$$u_c = U_{cm} \sin(\omega t + \psi_u),$$

Таким чином синусоїдальний струм

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_{cm} \cos(\omega t + \psi_u) = I_{cm} \sin\left(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2}\right) = I_{cm} \sin(\omega t + \psi_i),$$

де амплітуди зв'язані співвідношенням $I_{cm} = \omega C U_{cm}$,

а початкові фази $\psi_i = \psi_u + \frac{\pi}{2}$.

Для діючих значень відповідно

$$U_c = \frac{1}{\omega C} I_c = x_c I_c,$$

Векторна діаграма має вигляд

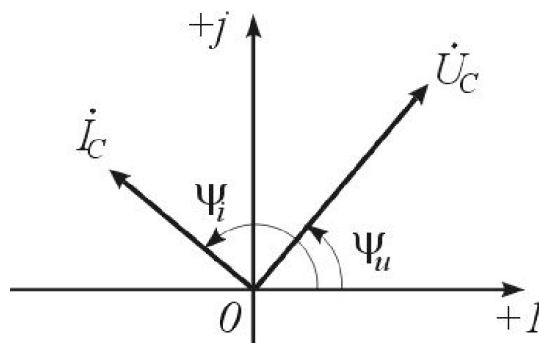


Рис 10. Векторна діаграма для ємнісного елемента

Напруга відстає по фазі від струму на кут $\varphi = \psi_i - \psi_u = \frac{\pi}{2}$.

Представимо струм і напругу в комплексній формі

$$\dot{I} = I_c e^{j\psi_i} \quad i \quad \dot{U}_c = U_c e^{j\psi_u}.$$

Закон Ома в комплексній формі для ємнісного елемента

$$\dot{U} = \frac{1}{\omega C} \dot{I} e; \quad \dot{U} = \frac{1}{\omega C} \dot{I} = -jx_c \dot{I}$$

де $\frac{1}{j\omega C} = -jx_c$ - комплексний опір ємнісного елемента.

Отже, ми ввели основні поняття електричних величин, виражених у комплексній формі.

Лекція №4

АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ

1. Схеми з'єднання елементів. Рівняння електричного стану кола.
2. Побудова векторних діаграм.
3. Потужність у колах змінного струму.
4. Резонанс напруг.

До електричного устаткування, яке використовується у дорожньому будівництві, відносяться електричні машини, електричні апарати та електричний привід. Якщо ці роботи виконуються в умовах стаціонарного електропостачання, інженер повинен визначитись з потужністю трансформатора, яка необхідна для забезпечення електроенергією кожного з електроприладів, що використовуються. Також треба врахувати потужність приладів освітлення та опалювання. При цьому треба таким чином навантажити фази джерела енергії, щоб перекіс фаз на призвів до аварійної ситуації. Для безаварійного та ефективного використання цього обладнання інженер повинен робити попередні розрахунки режимів роботи та навантаження електроустаткування.

Наприклад, при будівництві тунелів поряд зі стаціонарною системою освітлення використовується аварійна система. Головним елементом

живлення аварійної системи є акумуляторна батарея. Підзарядка АБ відбувається в єдиному електричному колі з іншим устаткуванням. Тому якщо скласти єдину еквівалентну електричну схему цього кола, то в ньому будуть відображені як індуктивні елементи (електричні машини та трансформатори), так і ємнісні елементи (акумулятори), а також активні елементи (опір обмоток та з'єднуючих проводів). Тому важливим є вивчення питань, пов'язаних з аналізом та розрахунком кіл змінного струму.

1. Схеми з'єднання елементів. Рівняння електричного стану кола

При розрахунках кіл змінного струму, як і кіл постійного струму, використовують закони Ома і Кірхгофа. Різниця полягає в тому, що в колах змінного струму необхідно враховувати кути зсуву фаз між струмами і напругами.

Елементи споживачів у колах змінного струму можуть бути увімкнені послідовно (рис.1,а), паралельно (рис.1,б) і за змішаною схемою (рис.1,в)

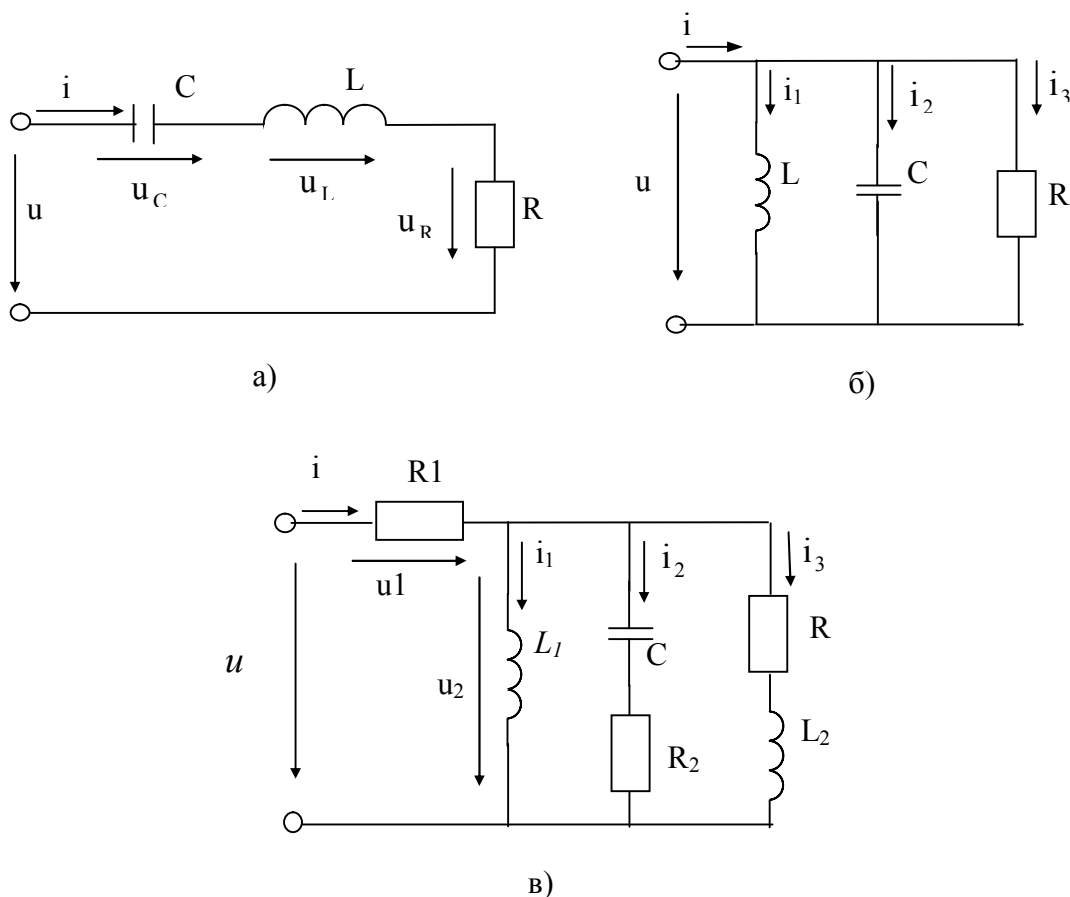


Рис.1. Схеми з'єднання елементів кола змінного струму:
 а – послідовна; б – паралельна; в - змішана

Розглянемо основні співвідношення у колах змінного струму на прикладі схеми з послідовним з'єднанням елементів (рис.2).

Рівняння електричного стану кола для миттєвих значень напруг при послідовному з'єднанні елементів має вигляд

$$u = u_R + u_L + u_C .$$

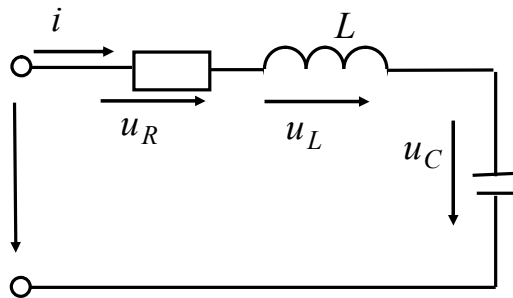


Рис.2. Електричне коло з послідовним з'єднанням елементів

Рівняння електричного стану може бути записане також у векторній формі як сума векторів напруг на елементах кола

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C .$$

Діючі значення падінь напруги на окремих елементах можна визначити за формулами

$$\begin{aligned} U_R &= IR; \\ U_L &= I x_L; \\ U_C &= I x_C. \end{aligned}$$

Напруги на елементах кола мають відповідні кути зсуву фаз відносно загального струму I . Наочне уявлення про фазове розташування векторів електричних величин дає векторна діаграма. Тому аналітичні розрахунки електричних кіл рекомендують супроводжувати побудовою векторних діаграм. Вони дають можливість якісно контролювати аналітичні розрахунки.

До аналітичних розрахунків, як вже відомо, відноситься визначення всіх діючих в електричному контурі струмів, напруг, потужностей, падінь напруг, визначення активних, реактивних та повних опорів, визначення напрямків струмів і напруг відповідно до знаку, отриманого під час числового розрахунку параметрів кола.

За допомогою векторної діаграми можливим більш наглядно отримати уявлення про всі кутові зсуви фаз (випередження, чи затримування) між напругами та струмами, діючими в електричному колі

2. Побудова векторних діаграм

Перш ніж розглянути порядок побудови векторної діаграми, слід звернути увагу на те, що векторні діаграми завжди будуються у масштабі.

Вище ми визначили діючі значення падінь напруг на його елементах. Крім того, на минулій лекції ми розглянули співвідношення фаз між напругою на кожному елементі кола та струмом, що протікає в ньому. Цієї інформації досить для побудови векторної діаграми.

Побудова векторної діаграми починається з побудови вектора струму, тому що при послідовному з'єднанні активного R , індуктивного L та ємнісного C елементів струм є загальним для всіх ділянок кола. Відносно до вектора струму з початку координат відкладаємо вектор падіння напруги на резистивному елементі. Нам відомо, що фаза напруги на резистивному елементі збігається з фазою струму, тому вектори спрямовані паралельно один одному (рис.3,а). Вектор падіння напруги на індуктивному елементі випереджає вектор струму на кут 90° (рис.3,б); відкладаємо його проти годинникової стрілки. Потім відкладаємо в масштабі вектор напруги на ємнісному елементі під кутом 90° , але у напрямку руху годинникової стрілки, на цьому елементі напруга відстає від струму (рис.3,в).

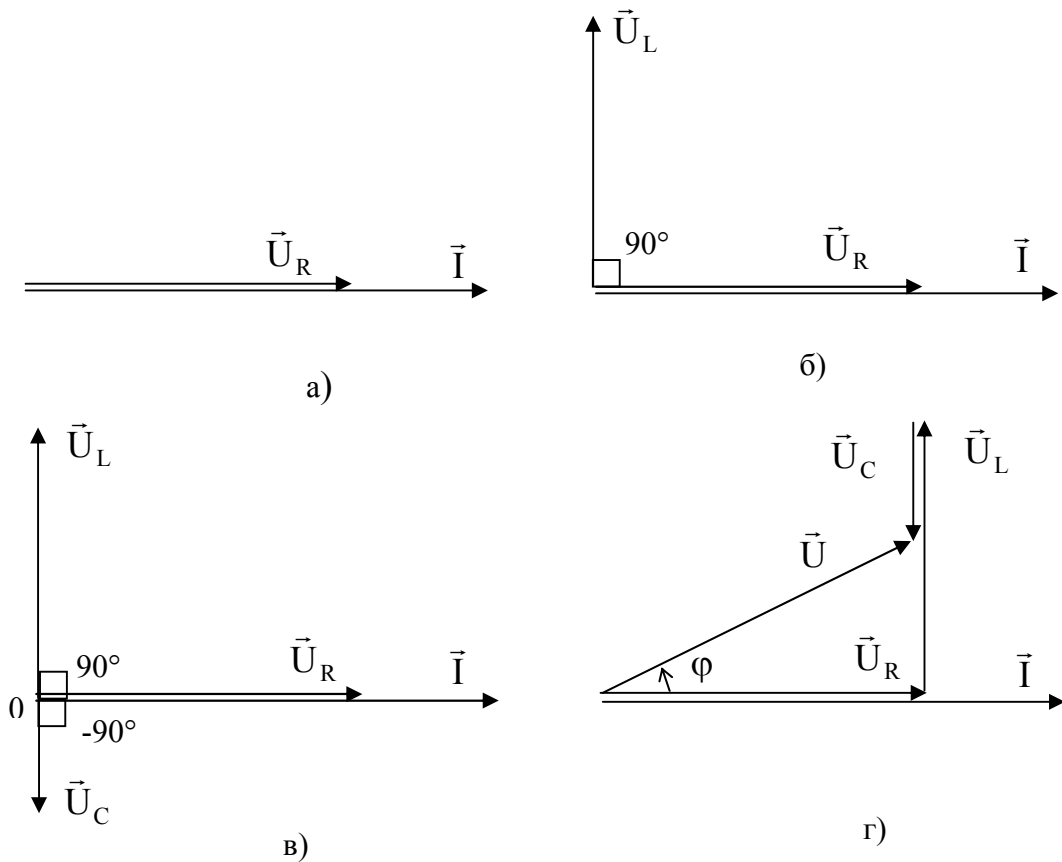


Рис.3. Побудова векторної діаграми

Сума побудованих векторів напруг дає вектор напруги на затискачах кола \vec{U} , який розташований під кутом φ відносно вектора струму (рис.3,г). Кут φ є кутом зсуву фаз між вхідною напругою та струмом у колі.

Кут зсуву фаз між струмом та вхідною напругою може бути як позитивним, так і негативним. Це залежить від співвідношення напруг на індуктивному та ємнісному елементах.

Розглянемо два види векторних діаграм (рис.4). У випадку коли реактивна напруга на індуктивному елементі більше напруги на ємнісному елементі, то результуючий вектор напруги \vec{U} складає з вектором струму позитивний кут зсуву фаз φ . У цьому випадку коло має активно-індуктивний характер (рис.4,а).

Якщо напруга на індуктивному елементі менше напруги на ємнісному елементі, то результуючий вектор напруги \vec{U} складає з вектором струму негативний кут зсуву фаз $-\varphi$. У цьому випадку коло має активно-ємнісний характер (рис.4,б).

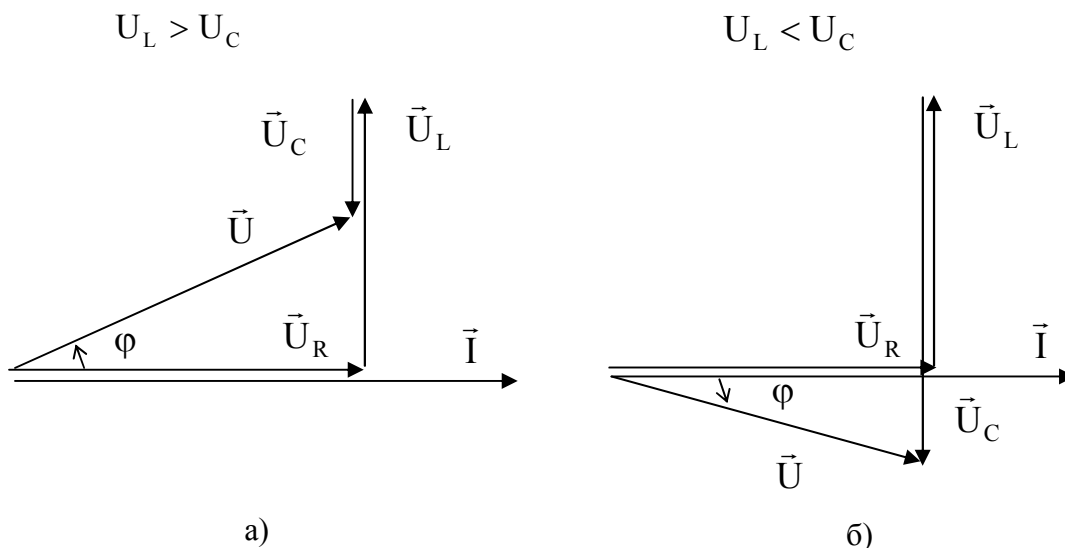


Рис.4. Векторні діаграми: а – коло має активно-індуктивний характер; б – коло має активно-ємнісний характер

Третій випадок, коли падіння напруги на реактивних елементах дорівнюють один одному, буде розглянутий пізніше.

З векторної діаграми можна вивести деякі аналітичні залежності між параметрами електричного кола (рис.5).

Вектори \vec{U} , \vec{U}_R та $(\vec{U}_L - \vec{U}_C)$ утворюють прямокутний трикутник, з якого можна одержати величину діючого значення напруги на затискачах кола

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

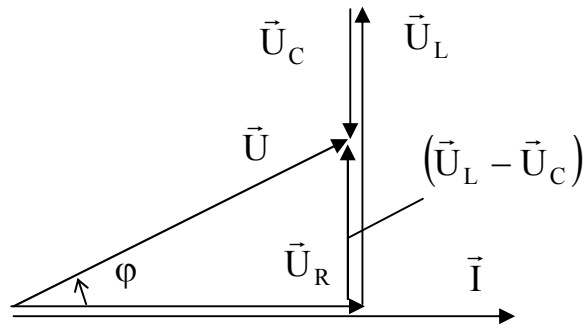


Рис.5. Векторна діаграма

Якщо виразити напруги на окремих елементах через струм і опори, одержимо

$$U = \sqrt{(IR)^2 + [(Ix_L) - (Ix_C)]^2} = \sqrt{(IR)^2 + \left[(I\omega L) - \left(I \frac{1}{\omega C} \right) \right]^2}.$$

Ця формула представляє собою закон Ома для послідовного кола. Його можна записати ще у такому виді

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + x^2}},$$

де R – активний опір кола; $x = x_L - x_C$ - реактивний опір електричного кола.

Поділивши сторони трикутника напруг на величину струму I , одержимо трикутник опорів оп. (рис.6) з якого можемо знайти співвідношення між опорамі кола.

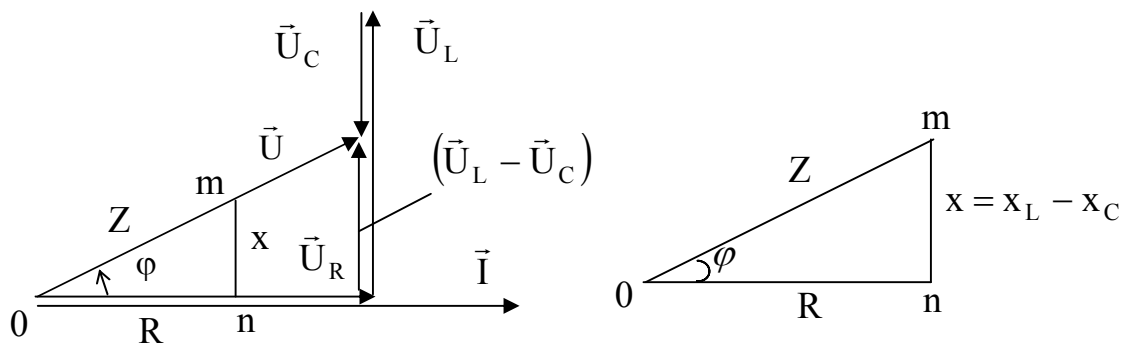


Рис.6. Трикутник опорів

Сторони трикутника опорів відповідно означають

R – активний опір кола;

$x = x_L - x_C$ - реактивний опір кола;

$$Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{R^2 + x^2} - \text{повний опір кола.}$$

Також з трикутника опорів можна визначити кут зсуву фаз між струмом у колі і напругою на його затискачах за формулою

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}} .$$

Тригонометричною функцією \arccos , аргументом якої буде одержане значення $\cos \varphi$.

3. Потужність у колах змінного струму

Електричні процеси у резистивних, індуктивних і ємнісних елементах є різними за фізичною природою. У резистивних елементах відбувається необоротне перетворення електричної енергії в інші види енергії. Середня швидкість необоротного процесу перетворення енергії в резистивному елементі визначається активною потужністю P .

В індуктивному і ємнісному елементах відбувається періодичне акумулювання енергії в магнітних і електричних полях, а потім енергія повертається в зовнішнє щодо цих елементів коло. У таких елементах не здійснюється незворотного перетворення електричної енергії в інші види, тобто активна потужність P дорівнює нулю. Енергетичні процеси в індуктивному і ємнісному елементах визначаються реактивною індуктивною потужністю Q_L і реактивною ємнісною потужністю Q_C . Реактивна потужність не здійснює ніякої корисної роботи, однак впливає на роботу схем, тому її треба урахувувати при розрахунках кіл.

Помноживши сторони трикутника напруг на векторній діаграмі (рис.7,а) на величину струму I , одержимо трикутник потужностей (рис.7,б).

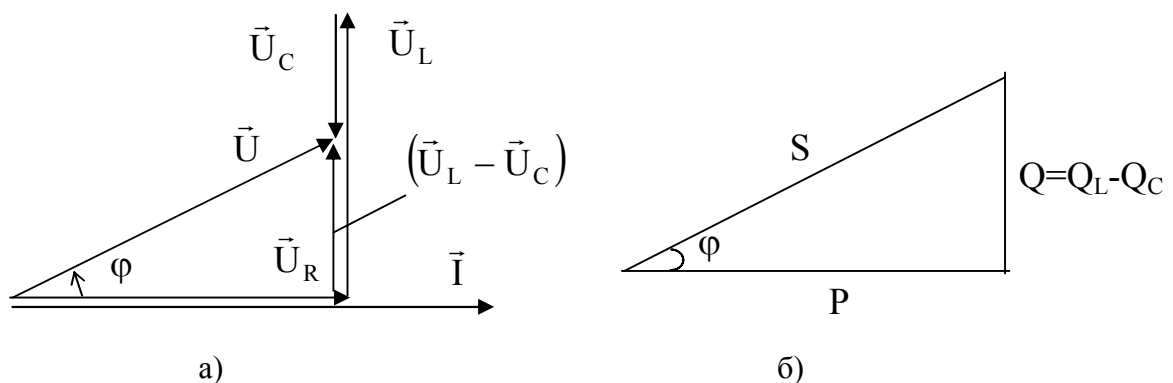


Рис.7. Векторна діаграма (а) та трикутник потужностей (б)

Сторони трикутника відповідно означають:

$P = U_R I = I^2 R$ - активна потужність кола; одиницею виміру є Вт;

$Q_L = U_L I = I^2 x_L$ - реактивна індуктивна потужність кола, яка обумовлена енергією магнітного поля, вар;

$Q_C = U_C I = I^2 x_C$ - реактивна ємнісна потужність кола, яка обумовлена енергією електричного поля, вар;

$Q = Q_L - Q_C = I^2 x$ - реактивна потужність, якою приймач обмінюється з колом, вар;

$S = UI = I^2 Z$ - повна потужність кола, В·А.

З трикутника потужностей можна установити такий взаємозв'язок між повною, активною і реактивною потужностями:

– повна потужність кола

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} = UI ;$$

– реактивна потужність кола

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi ;$$

– активна потужність кола

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi .$$

З останнього співвідношення одержимо

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} .$$

Відношення активної потужності P до повної S називається коефіцієнтом потужності $\cos \varphi$. Він показує, яку частку усієї вироблюваної джерелом потужності складає активна потужність. Очевидно, що чим більше значення має $\cos \varphi$, тим більш економічно працює енергосистема.

4. Резонанс напруг

Раніше нами були розглянуті два випадки співвідношень між напругами на реактивних елементах. Тепер розглянемо більш докладно випадок, коли напруга на індуктивному елементі за діючим значенням дорівнює напрузі на

ємнісному елементі, тобто $U_L = U_C$. Це є особливим режимом роботи послідовного кола, який зветься режимом резонансу.

Під резонансом електричного кола розуміють такий стан кола, коли струм і напруга збігаються за фазою, і, отже, еквівалентна схема кола являє собою активний опір.

У колі, де активний, індуктивний та ємнісний елементи з'єднані послідовно, може виникнути резонанс напруг.

При резонансі напруг в електричному колі малі напруги, що прикладені до кола, можуть визвати напруги на окремих його ділянках.

Як відзначалося раніше, при резонансі струм і напруга збігаються за фазою, тобто кут зсуву фаз $\varphi = 0$, і повний опір кола дорівнює його активному опору

$$Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = R.$$

Ця рівність буде мати місце, якщо реактивний опір кола дорівнює нулю

$$x = x_L - x_C = 0.$$

Тобто

$$x_L = x_C; \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Частота, при якій спостерігається режим резонансу, зветься резонансною:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Величина струму при резонансі дорівнює

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

Падіння напруг на елементах кола визначаються за формулами

$$\begin{aligned} U_R &= I \cdot R = \frac{U}{R} \cdot R = U; \\ U_L &= I \cdot x_L = \frac{U}{R} \cdot x_L = U \cdot \frac{x_L}{R}; \\ U_C &= I \cdot x_C = \frac{U}{R} \cdot x_C = U \cdot \frac{x_C}{R}. \end{aligned}$$

З цих співвідношень можна зробити висновок, що у режимі резонансу напруги на індуктивному та ємнісному елементах у стільки разів більші за напругу на затискачах кола, у скільки разів реактивні опори $x_L = x_C$ більші, ніж активний опір кола.

Векторна діаграма при резонансі напруг має вид, наведений на рис.8,а. Вона підтверджує той факт, що струм співпадає по фазі з напругою, яка прикладена до кола, і що напруга на активному опорі дорівнює вхідній напрузі.

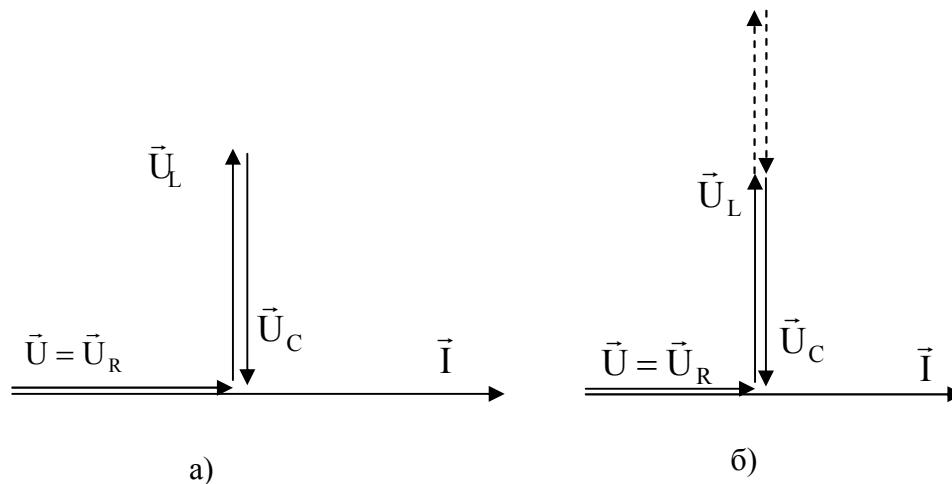


Рис.8. Резонанс напруг в послідовному колі: а - векторна діаграма; б – ілюстрація перенапруг при резонансі

Реактивна потужність при резонансі дорівнює нулю:

$$Q = Q_L - Q_C = U_L I - U_C I = 0,$$

оскільки $U_L = U_C$.

Повна потужність дорівнює активній потужності

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

тому що реактивна потужність дорівнює нулю $Q = 0$.

Коефіцієнт потужності дорівнює одиниці

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} = 1,$$

тому що $S = P$ і $Z = R$.

В електроенергетичних пристроях великої потужності резонанс напруг явище небажане. Це пов'язано з можливістю перенапруг, у випадках, коли

реактивні опори $x_L = x_C$ значно перевищують активний опір кола R , і тому напруги на елементах кола можуть у кілька разів перевищувати робочі напруги установки. Це добре видно на зображеній векторній діаграмі (рис.8,б).

Однак у деяких випадках навмисно домагаються режиму резонансу, з метою підвищення коефіцієнту потужності $\cos \varphi$.

Також у автоматиці, радіотехніці, телефонії, резонанс напруг часто застосовується для настроювання кіл на задану частоту.

Із умови резонансу

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

впливає, що режим резонансу можна одержати:

а) зміною індуктивності (при заданій частоті) до величини

$$L_{\text{рез}} = \frac{1}{\omega^2 C};$$

б) зміною ємності до величини

$$C_{\text{рез}} = \frac{1}{\omega^2 L};$$

в) зміною частоти ω (при заданих параметрах кола L і C)

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

З викладеного матеріалу ми визначили, що при розрахунку кіл змінного струму потрібно знати не лише діючі значення шуканих величин (струмів та напруг), але й кути зсуву фаз між ними. Це можна здійснити за допомогою векторних діаграм, які обов'язково будуються у масштабі.

Також ми розглянули явище резонансу напруг у колі з послідовним з'єднанням елементів і визначили, що умовою резонансу є рівність опорів реактивних елементів розглянутого кола, а напруга на затискачах дорівнює падінню напруги на активному опорі.

Крім того, був визначений основний показник, що характеризує ступінь економічності електричних систем – це коефіцієнт потужності $\cos \varphi$. Коефіцієнт потужності і повна потужність кола поряд з іншими параметрами є розрахунковими величинами, оскільки визначають габаритні розміри

трансформаторів, генераторів, двигунів та інших електротехнічних пристроїв, що використовуються у дорожньому будівництві.

Лекція №5

ТРИФАЗНІ КОЛА

1. Трифазна система, основні співвідношення.
2. З'єднання джерела енергії й приймача за схемою зірка.
3. З'єднання джерела енергії й приймача за схемою трикутник.
4. Активна, реактивна і повна потужності трифазної симетричної системи.

1. Трифазна система, основні співвідношення

На сьогоднішній день для передачі і поширення енергії у переважній більшості випадків застосовуються трифазні системи.

Трифазна система (коло) – це коло, що складається з трьох однофазних кіл синусоїдального струму однієї частоти з незалежними джерелами, з'єднаних за визначеною схемою.

Поєднані кола синусоїдального струму прийнято називати фазами.

Джерелом енергії у трифазній системі служить трифазний генератор. Миттєві значення ЕРС трифазних обмоток генератора рівні

$$e_A = E_m \sin \omega t, \quad e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3);$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3) = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3).$$

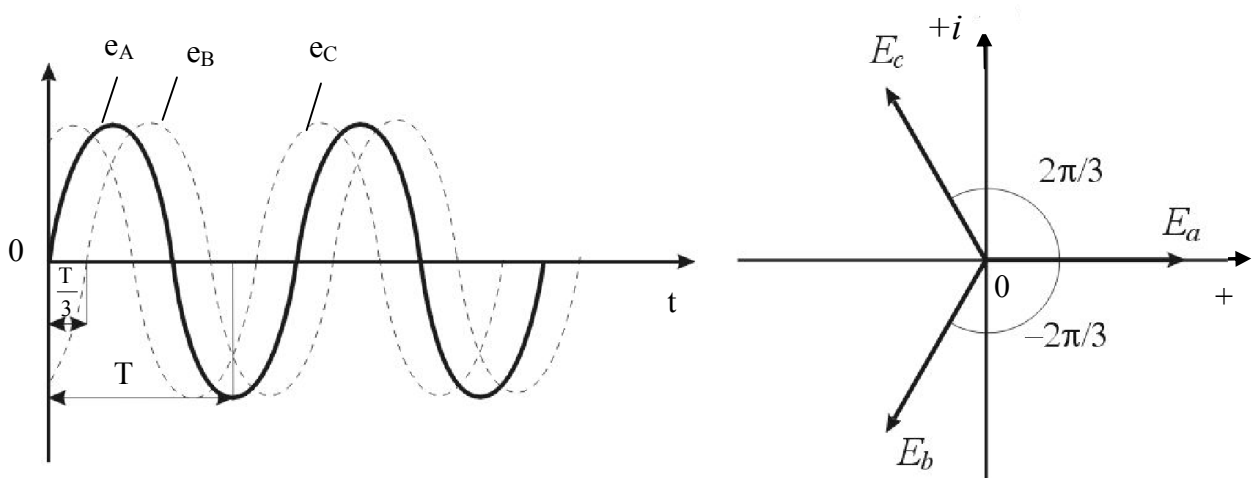


Рис.1. Векторна діаграма трифазного кола

Як видно з векторної діаграми, сума трьох векторів комплексних значень ЕРС дорівнює нулю. Отже, алгебраїчна сума комплексних значень фазних ЕРС і алгебраїчна сума миттєвих значень фазних ЕРС генератора дорівнюють нулю

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

$$e_A + e_B + e_C = 0.$$

Комплексні значення ЕРС трифазного симетричного генератора можна виразити через однакове для всіх трьох фаз діюче значення E_ϕ і відповідний комплексний множник

$$\dot{E}_A = E_\phi e^{j0^\circ} = E_\phi ;$$

$$\dot{E}_B = E_\phi e^{-j2\pi/3} = E_\phi e^{-j120^\circ} = E_\phi \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) ;$$

$$\dot{E}_C = E_\phi e^{j2\pi/3} = E_\phi e^{j120^\circ} = E_\phi \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right).$$

Комплексна величина $e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ називається фазним множником трифазної системи і позначається буквою 'a'. Таким чином,

$$\dot{E}_A = E_\phi ; \dot{E}_B = E_\phi a^2 ; \dot{E}_C = E_\phi a.$$

Для одержання трифазної системи необхідно певним чином з'єднати фази джерела енергії і фази приймача. Можливі два основних способи з'єднання в трифазній системі – з'єднання джерела енергії і приймача за схемою зірка і з'єднання джерела енергії й приймача за схемою трикутник.

2. З'єднання джерела енергії й приймача за схемою зірка

У джерела енергії і приймача, виконаних за схемою зірка ("Y"), усі кінці фазних обмоток генератора з'єднуються у вузол N. Такий же вузол n утворює з'єднання трьох фаз приймача, а три зворотних дроти фаз системи з'єднуються в один загальний нейтральний провід.

Інші три дроти, що з'єднують генератор із приймачем, називаються лінійними.

Вузол, що утворюють обмотки фаз генератора чи фаз приймача, називається нейтральною точкою (чи нейтраллю).

Не беручи до уваги опори проводів, визначимо струми фаз приймача й генератора

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_A}, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{\underline{Z}_B}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{\underline{Z}_C}.$$

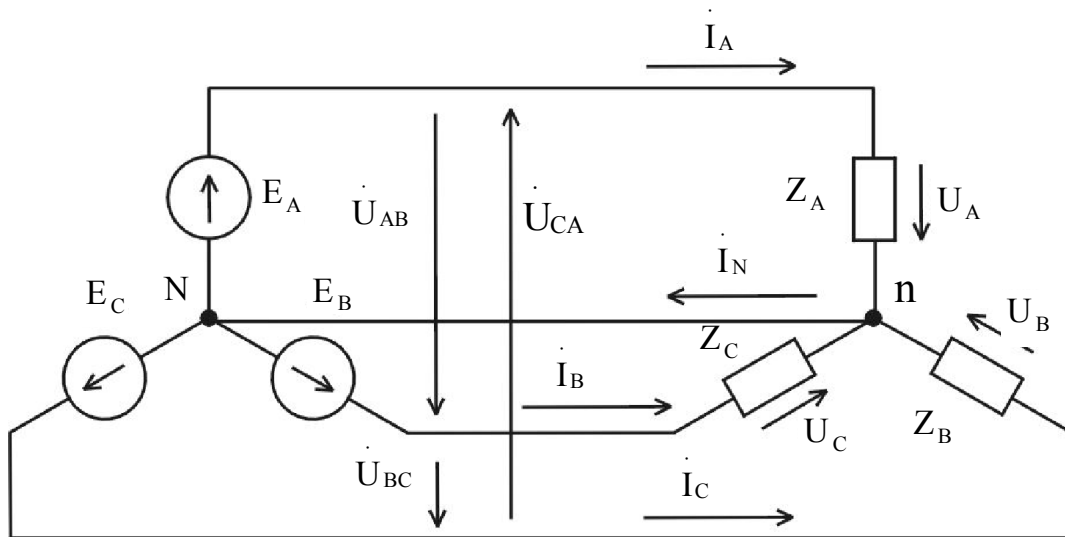


Рис.2. Схема з'єднання джерела енергії й приймача за схемою зірка

Струм у нейтральному проводі $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

Приймач з однаковими опорами всіх трьох фаз називається симетричним.

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = Z e^{j\varphi}.$$

При симетричному приймачі в струмах усіх фаз однакові діючі значення I_φ й однакові зрушення фаз φ щодо відповідних фазних ЕРС, струм у нейтральному проводі дорівнює нулю. Тому у випадку симетричного приймача (чи симетричного навантаження генератора) нейтральний провід не потрібний і не прокладається. Прикладом такого симетричного приймача є трифазний двигун із з'єднанням трифазних обмоток за схемою зірка. У трифазній системі напруги \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C між виводами кожної фазної обмотки генератора чи кожної фази приймача називають фазними напругами.

У симетричній трифазній системі діючі значення фазних напруг однакові: $U_A = U_B = U_C = U_\phi$.

Фазними струмами називаються струми у фазних обмотках генератора чи у фазах приймача.

Напруги між лінійними проводами називаються лінійними й лінійними називаються струми в лінійних проводах.

Запишемо по другому закону Кірхгофа вираз для визначення лінійних напруг

$$U_{AB} = E_A - E_B = U_A - U_B = U_\phi e^{j30^\circ};$$

$$U_{BC} = E_B - E_C = U_B - U_C = U_\phi e^{-j90^\circ};$$

$$U_{CA} = E_C - E_A = U_C - U_A = U_\phi e^{j150^\circ},$$

де U_ϕ - діюче значення лінійної напруги.

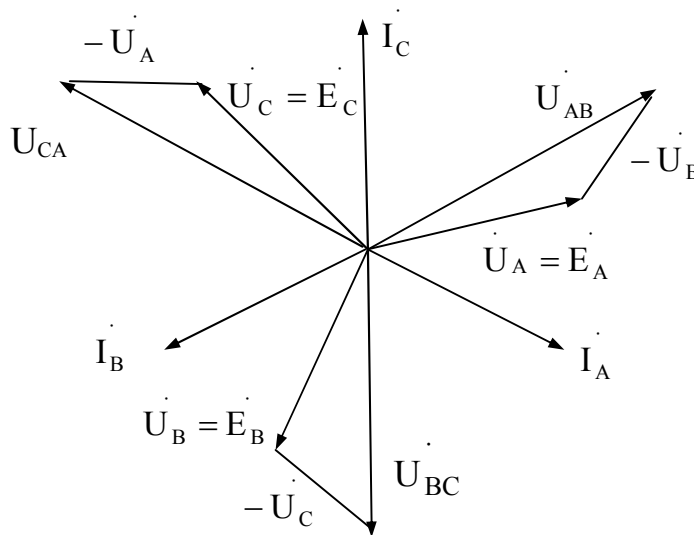


Рис.3. Векторна діаграма

З векторної діаграми видно, що між діючими значеннями в цьому випадку справедливе співвідношення $U_\phi = 2U_\phi \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_\phi$.

Наприклад, лінійна напруга $U_\phi = 380$ В, тоді $U_\phi = 220$ В чи $U_\phi = 220$ В, тоді $U_\phi = 127$ В.

При з'єднанні джерела енергії й приймача за схемою зірка лінійні струми рівні відповідним фазним струмам $I_\phi = I_\phi$

Кожен трифазний двигун являє собою симетричний приймач. Тому для підключення електродвигунів до джерела енергії застосовують трипровідні лінії.

Але для освітлювального навантаження нейтральний провід необхідний, оскільки немає підстав розраховувати на повну симетрію такого трифазного приймача.

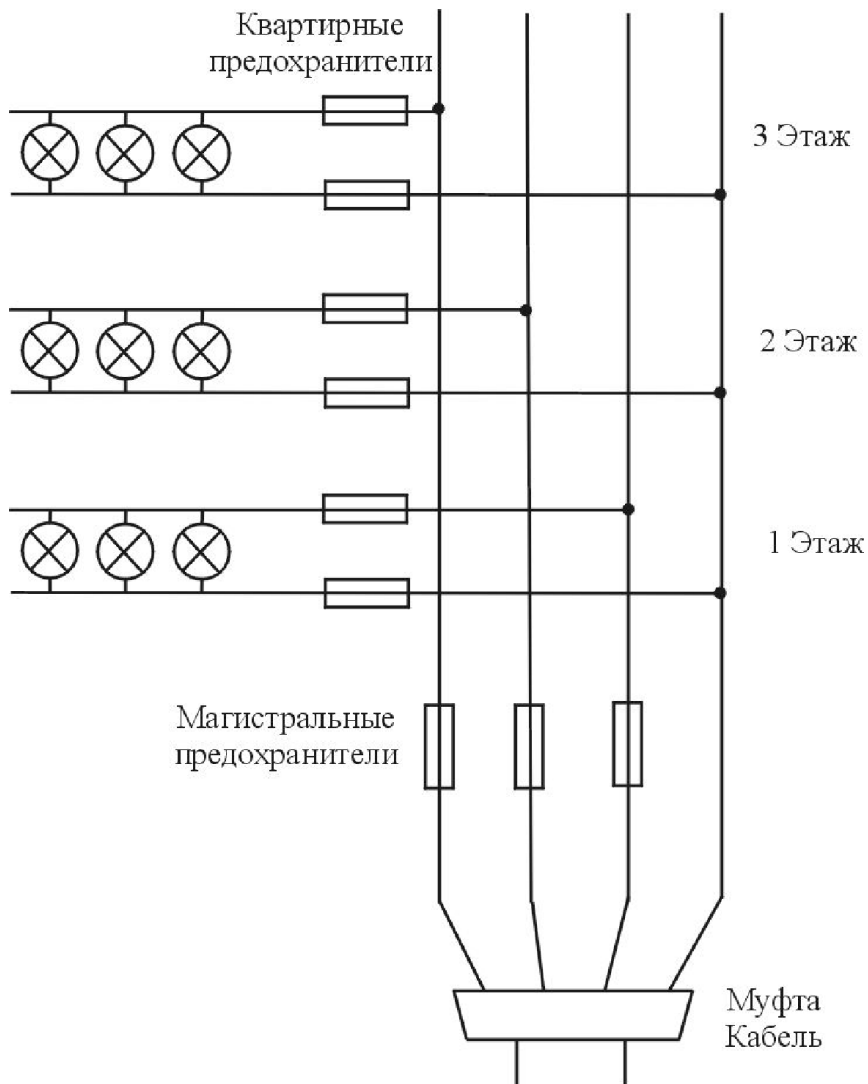


Рис.4. Схема чотирьохпровідної освітлювальної магістралі

У нейтральному проводі чотирьохпровідної освітлювальної магістралі заборонена установка запобіжників чи вимикачів, тому що при відключенні нейтрального дроту напруги можуть стати нерівними. В результаті в одних фазах може спостерігатися недонапруга, а в інших фазах – перенапруга і швидке перегорання ламп. Якщо при такому з'єднанні перегорить один з магістральних запобіжників, то відключаться лампи тільки однієї фази.

3. З'єднання джерела енергії й приймача за схемою трикутник

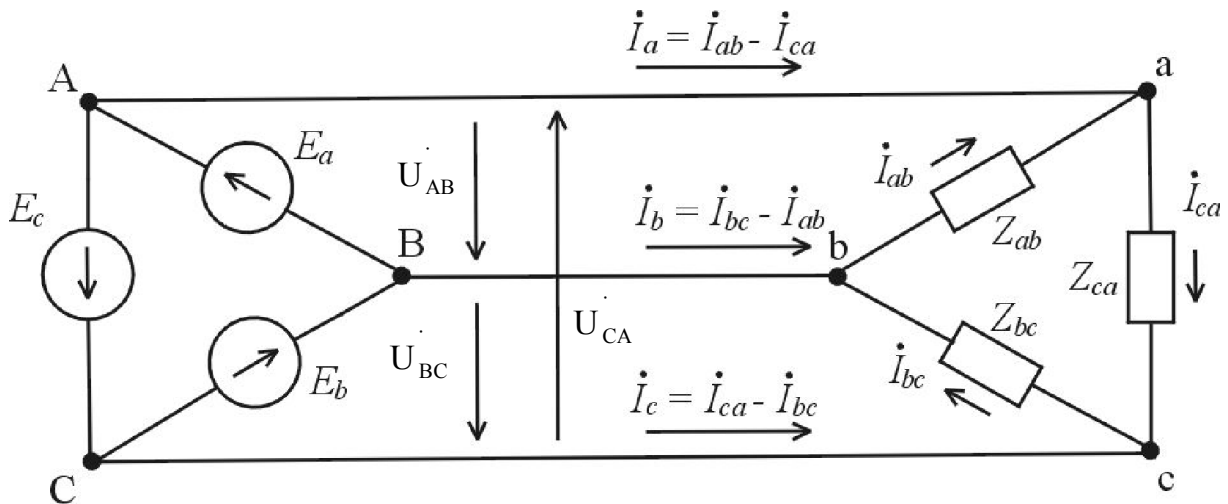


Рис.5. Схема з'єднання джерела енергії й приймача за схемою трикутник

У трифазній системі, виконаній за схемою трикутник, нейтральний провід відсутній.

Лінійні напруги рівні відповідним фазним напругам

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

За законом Ома комплексні значення фазних струмів

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}},$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{E}_B}{\underline{Z}_{BC}} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}},$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{E}_C}{\underline{Z}_{CA}} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

У симетричного приймача

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z}e^{j\varphi},$$

і у всіх фазних струмів однакові діючі значення I_ϕ й однакові зрушення фаз щодо відповідних ЕРС чи фазних напруг.

З трикутників струмів випливає, що в симетричній трифазній системі

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

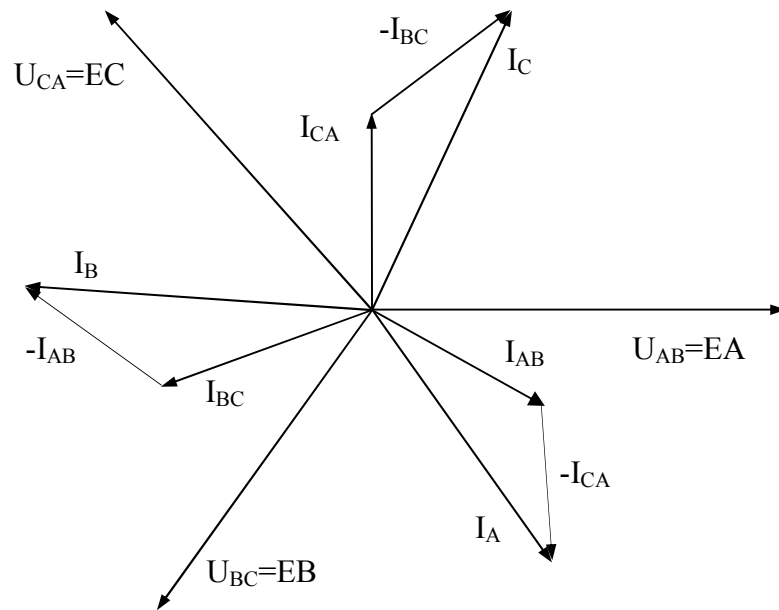


Рис.6. Векторна діаграма

Як випливає з (1), що значення лінійних і фазних напруг рівні один одному і при несиметричному приймачі $U_{л}=U_{\phi}$.

Перевагою з'єднання джерела енергії і приймача за схемою трикутник у порівнянні з трипровідною системою, з'єднаної за схемою зірка, є взаємна незалежність фазних струмів. Якщо при такому з'єднанні перегорить один з магістральних запобіжників (наприклад, у лінійному проводі В), то лампи в двох фазах (АВ і ВР) виявляться послідовно увімкненими, і при однаковій потужності ламп напруга на лампах кожної фази буде дорівнює половині лінійної (номінальної) напруги, напруга на лампах третьої фази (СА) залишиться нормальною.

4. Активна, реактивна і повна потужності трифазної симетричної системи

Активною потужністю (часто просто потужністю) трифазної системи називається сума активних потужностей усіх фаз джерела енергії, рівна сумі активних потужностей усіх фаз приймача.

У симетричній трифазній системі при будь-якій схемі з'єднання для кожної фази потужності джерела енергії й приймача однакові. У цьому випадку

$P = 3P_{\phi}$ і для кожної фази справедлива формула активної потужності синусоїдального струму $P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$.

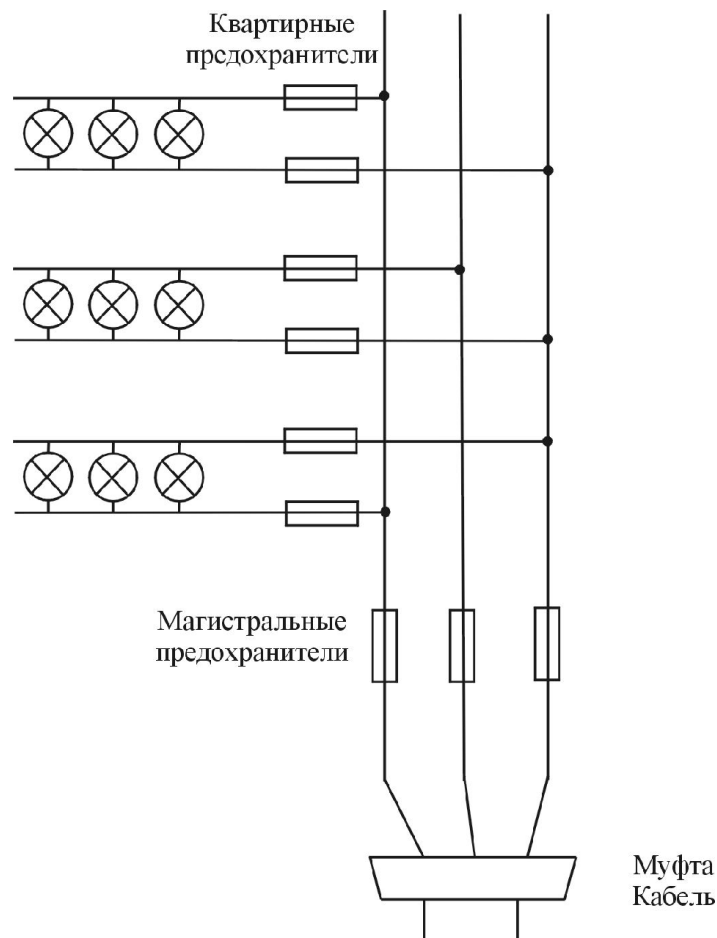


Рис.7. Схема трипровідної освітлювальної магістралі

У промислових установках приймачі звичайно симетричні чи майже симетричні, тобто потужність може бути обчислена по наведених формулах.

Реактивною потужністю трифазної системи називається сума реактивних потужностей усіх фаз приймача. Реактивна потужність симетричної трифазної системи $Q = 3Q_{\phi} = 3U_a I_{\phi} \sin \varphi$.

Щодо лінійних струмів і напруг $Q = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \sin \varphi$.

Комплексною потужністю трифазної системи називається сума комплексних потужностей усіх фаз джерела енергії, рівна сумі комплексних потужностей усіх фаз приймача.

Повна потужність симетричної трифазної системи

$$S = U_{\phi} I_{\phi};$$

$$S = \sqrt{3}U_{л} I_{л}.$$

ТРАНСФОРМАТОРИ. ПРИЗНАЧЕННЯ, БУДОВА І ПРИНЦИП ДІЇ

1. Трансформатор.Класифікація.
2. Принцип дії однофазного трансформатора
3. Холостий хід трансформатора
4. Векторна діаграма
5. Режим короткого замикання трансформатора
6. Потужність та ККД трансформатора
7. Трифазні трансформатори
8. Автотрансформатори
9. Вимірювальні трансформатори

1. Трансформатор.Класифікація

Трансформатор - це статичний електромагнітний апарат, що служить для перетворення електричної енергії перемінного струму з одним значенням напруги в електричну енергію з іншим значенням напруги при збереженні незмінної частоти струму.

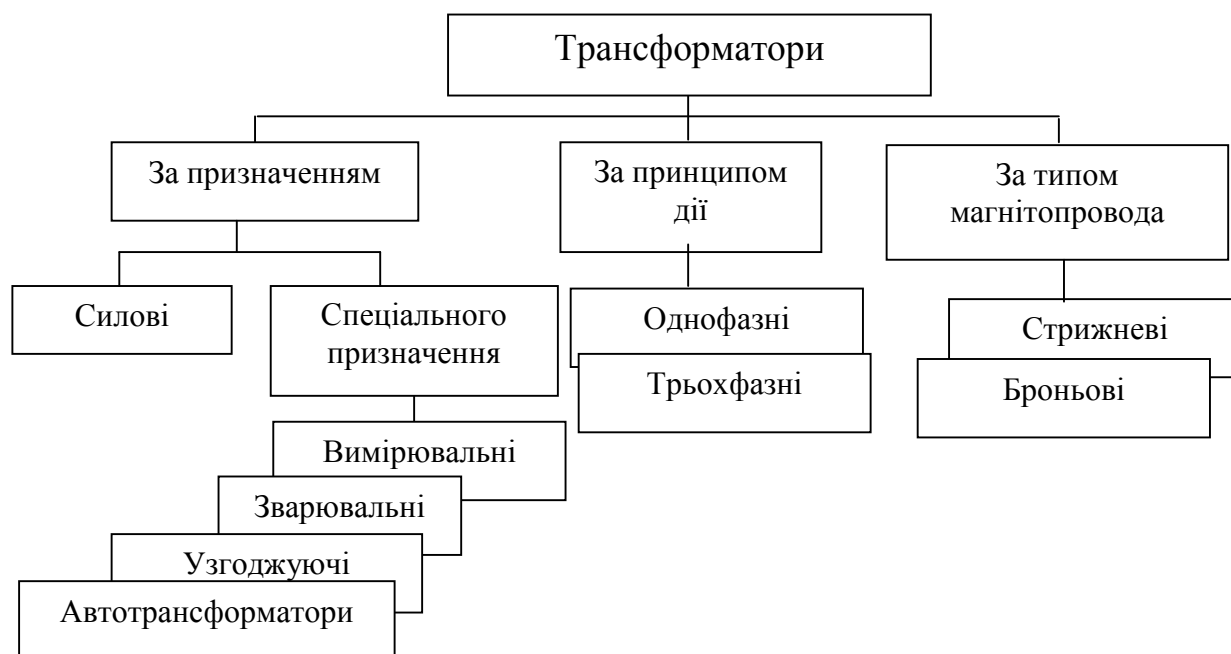


Рис.2. Класифікація трансформаторів

Трансформатори отримали поширення у зв'язку з передачею електричної енергії на великі відстані. Чим вище напруга, тим при тій же

переданій потужності буде менше значення струму і тем менше виходить необхідний перетин проводів лінії передач.

Також трансформатори використовуються в побутових електроприладах, в електроніці, коли потрібно одержати різні за значенням напруги.

Перетворення напруги в трансформаторах здійснюється перемінним магнітним потоком двох ідуктивно-пов'язаних між собою обмоток.

Обмотка, що підключається до джерела електричної енергії, називається первинною, інша обмотка на яку увімкнене навантаження – вторинною. Якщо через трансформатор необхідно здійснити живлення двох і більш навантажень з різною напругою, то виконується відповідне число вторинних обмоток.

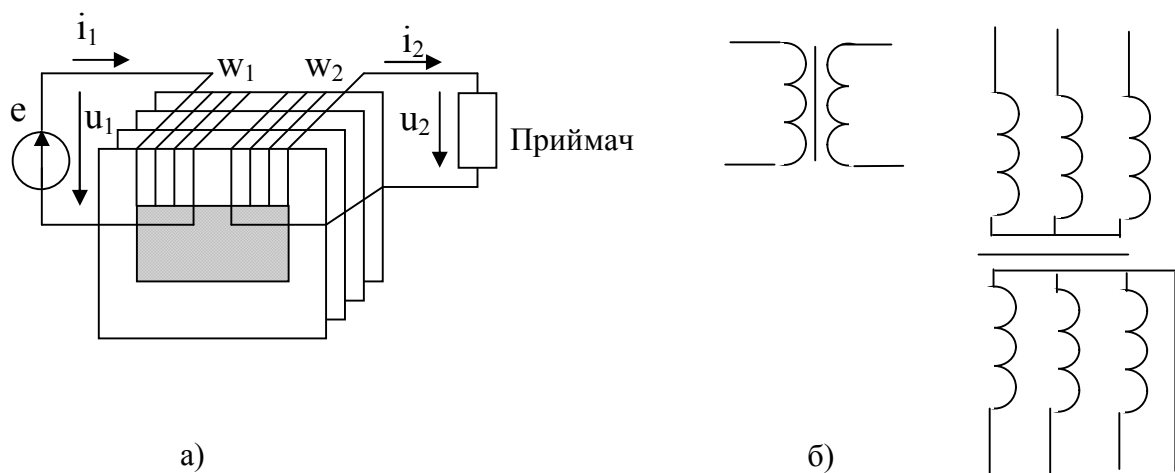


Рис.1. Трансформатор: а – конструкції, б - умовне забозначення

Основними частинами трансформатора є магнітопровід і обмотки. Магнітопровід збирається з тонких ізованих один від одного листів електротехнічної сталі. Частини магнітопровода, на яких розташовуються обмотки, називаються стрижнями. Частини магнітопровода, замикаючі стрижні, називають ярмом.

Первинна обмотка – ближче до стрижня, зверху – вторинна, котра відокремлюється від первинної ізоляційною прокладкою.

На щитку трансформатора вказується:

1. номінальні напруга – вище і нижче, у відповідності , з чим варто розрізняти обмотку вищої напруги (ВН) і обмотку нижчої напруги (НН) трансформатора;
2. номінальна повна потужність ($У \cdot А$),
3. струми (А) при повній номінальній потужності,
4. частота, число фаз, схема з'єднання, спосіб охолодження.

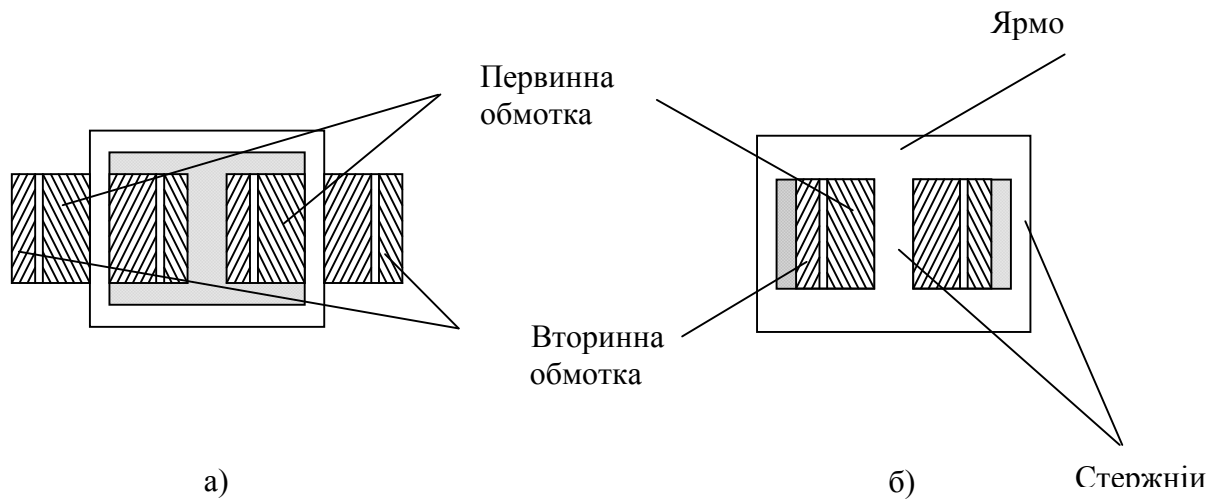


Рис.3. Трансформатор: а – стрижневий, б – броньовий

2. Принцип дії однофазного трансформатора

Змінний струм, що протікає по первинній обмотці, викликає утворення в сталевому сердечнику перемінного магнітного струму Φ . Цей струм пов'язаний з обома обмотками і викликає появу в кожній з них перемінної ЕРС. Тому вторинна обмотка може розглядатися як джерело перемінної напруги. Якщо вторинне коло буде замкнуте, то по ньому потече струм.

ЕРС, що індукуються в одному витку первинної і вторинної обмоток, знаходяться на основі закону електромагнітної індукції

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} .$$

Для магнітного потоку, що змінюється по синусоїдальному закону

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t ,$$

де Φ , [Вб] – миттєве значення потоку;
 Φ_m – амплітудне значення потоку,
маємо

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \Phi_m \omega \cos \omega t = \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) .$$

Позначимо амплітудне значення ЕРС в одному витку

$$E_m = \omega \Phi_m .$$

Тоді

$$e = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) .$$

Таким чином, індукуюча ЕРС відстає по фазі від потоку на 90° .
Знайдемо діюче значення ЕРС:

$$E = \frac{\omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f \Phi_m$$

Якщо в первинній обмотці w_1 витків, а у вторинній w_2 витків, то повна ЕРС кожної обмотки дорівнює

$$E_1 = 4,44 \omega_1 f \Phi_m ;$$

$$E_2 = 4,44 \omega_2 f \Phi_m .$$

Основною характеристикою трансформатора є відношення ЕРС первинної і вторинної обмоток, що називається коефіцієнтом трансформації

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} .$$

Для понижуючих трансформаторів $W_1 > W_2$ і $k > 1$. Для підвищувальних $W_1 < W_2$ і $k < 1$.

Первинна потужність, тобто потужність, споживана трансформатором з мережі, дорівнює

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 .$$

Вторинна потужність, що віддається споживачу, дорівнює

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 .$$

Якщо не враховувати втрат у трансформаторі то

$$P_1 \approx P_2 .$$

У залежності від значення опору навантаження розрізняють три режими роботи трансформатора:

1. $Z_H = \infty$ - режим холостого ходу;

2. $0 < Z_H < \infty$ - режим навантаження;
3. $Z_H = 0$ - режим короткого замикання.

6. Потужність та ККД трансформатора

На відміну від двигунів і ряду інших приймачів енергії, трансформатори нормуються не по активній, а по повній потужності. Це відбувається тому, що розміри трансформаторів при даній частоті визначаються в основному двома величинами – номінальною напругою і номінальним струмом. Номінальний, тобто припустимий по нагріванню, визначає перетин проводів обмоток трансформатора. Від напруги, що приходить на один виток обмотки, залежить магнітний потік, а, отже, і розміри сердечника. Тому основною паспортною величиною трансформатора є його повна номінальна потужність

$$S_{1H} = U_{1H} I_{1H} .$$

При трансформації електричної енергії в трансформаторі виникають втрати. Втрати в трансформаторі поділяються на постійні, змінні, залежні від навантаження. Постійні втрати потужності P_c складаються з втрат у сталевому сердечнику, на гістерезис і вихрові струми. Втрати в сталі визначаються величиною магнітного потоку і частотою і не залежать від навантаження, тому що при незмінній первинній напрузі і частоті амплітуда потоку незмінна. Втрати в сталі практично дорівнюють активній потужності, що споживається трансформатором при холостому ході.

Змінні втрати являють собою втрати міді в обмотках

$$P_m = P_{1m} + P_{2m} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 .$$

Втрати в обмотках при номінальному навантаженні $I_1 = I_{1H}$ рівні активній потужності в досліді короткого замикання для номінального струму I_{1H} .

ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_c - P_m}{P_1} = 1 - \frac{P_c + P_m}{P_1} ,$$

де P_1 і P_2 – споживані активні потужності трансформатора.

При холостому ході $P_2 = 0$ і $\eta = 0$.

Далі з ростом потужності, що віддається, ККД росте, досягає деякого максимального значення і потім починає зменшуватися.

Зменшення ККД при великих навантаженнях супроводжується сильним збільшенням втрат в обмотках, тому що вони ростуть пропорційно квадрату струму.

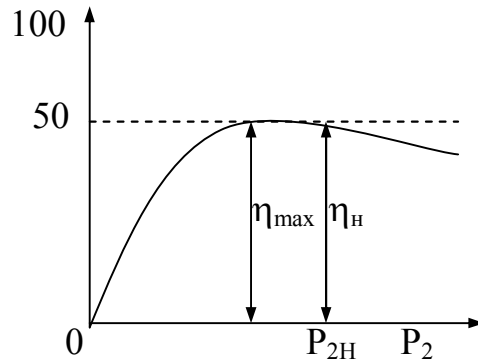


Рис.1. ККД трансформатора

Можна показати, що максимальний ККД має місце при $P_c = P_m$.

Трансформатор конструюється так, щоб максимальне значення ККД досягалось при найбільш ймовірному навантаженні, рівному $(0,5 - 0,75)P_{2H}$. Номінальне значення ККД (при $P_2 = P_{2H}$) близьке до максимального значення $\eta_H = \eta_{max}$ і досягає у великих трансформаторах 98 – 99%. У трансформаторах малої потужності ККД може знижуватися до 50 – 70%.

7. Трифазні трансформатори

Трифазний трансформатор складається з трьох однофазних, магнітопроводи яких об'єднані в один загальний трьохстержневий.

Якщо три однофазних двохобмоточних трансформатора розмістити під кутом 120° один до одного, а первинні обмотки з'єднати зіркою і підключити до трифазної мережі, то в них виникнуть струми ХХ.

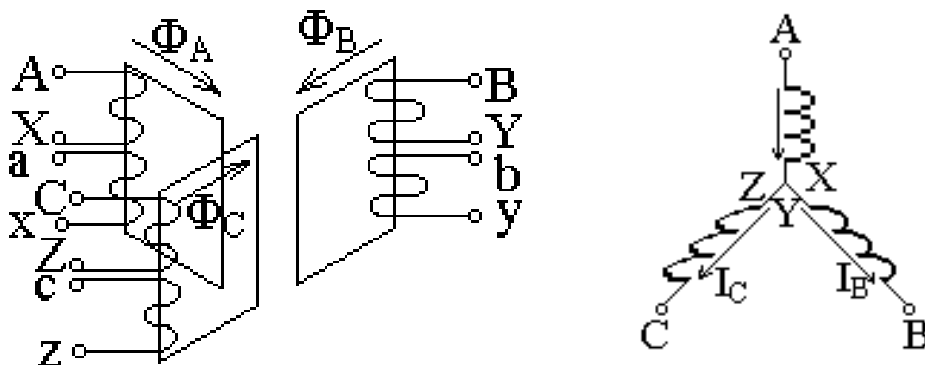


Рис. 8. Трифазний трансформатор

Струми будуть мати однакові значення, але зміщені відносно один одного на 120° . Магнітні потоки, створювані струмами, також будуть зрушені на 120° . Сума магнітних потоків, так само як і струмів, дорівнює нулю. Якщо стрижні без обмоток об'єднати в один, то в цьому стрижні магнітного потоку не буде. Тому потреба в ньому відпадає. У результаті утвориться трифазний трансформатор. Однак виготовлення такого трансформатора технічно й технологічно затруднене. Тому виготовляють трансформатор на плоскому сердечнику. Це істотно не впливає на роботу трансформатора, хоча струм обмотки, що намагнічує, середнього стрижня небагато зменшиться (струм ХХ) і з'явиться деяка асиметрія.

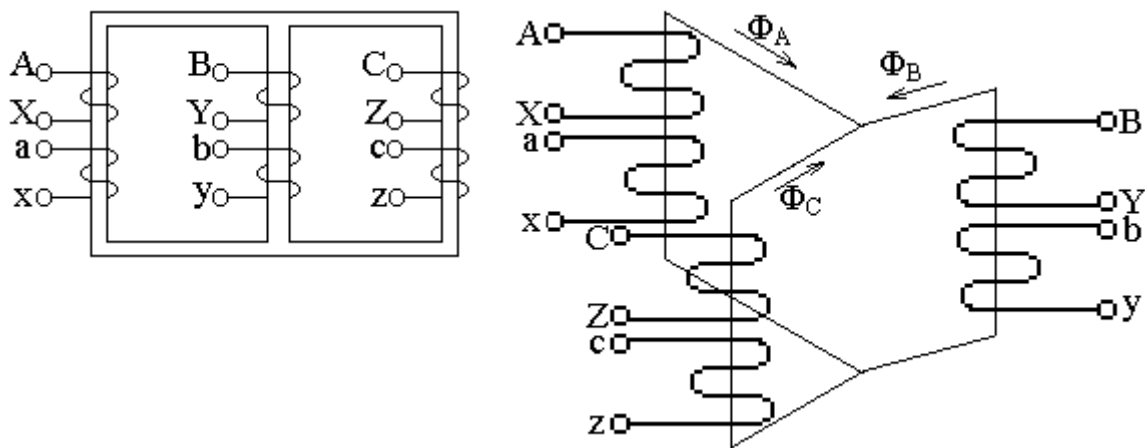


Рис. 9. Схема трифазного трансформатора

Аналіз роботи й розрахунок трифазних трансформаторів виробляється аналогічно однофазним за умови рівномірного навантаження кожної фази.

Первинні і вторинні обмотки трифазних трансформаторів можуть бути з'єднані Y , Y_0 , Δ . Найбільш розповсюджені схеми з'єднання Y/Y_0 , Y/Δ , Y_0/Δ .

8. Автотрансформатори

Автотрансформатор – це однообмоточний трансформатор. Від двохобмоточного він відрізняється тим, що вторинна обмотка є частиною первинної. При цьому обмотки мають не тільки магнітну, але і гальванічний (безпосередньо електричний) зв'язок.

В автотрансформаторі (рис.10) електрична енергія з первинного кола у вторинне передається і за допомогою перемінного магнітного потоку, і через гальванічний зв'язок.

Розглянемо, як розрахувати струми первинної і вторинної ланок АТ.

Напряга U_2 визначається зі співвідношення

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}.$$

$$U_2 = U_1 \frac{W_2}{W_1}.$$

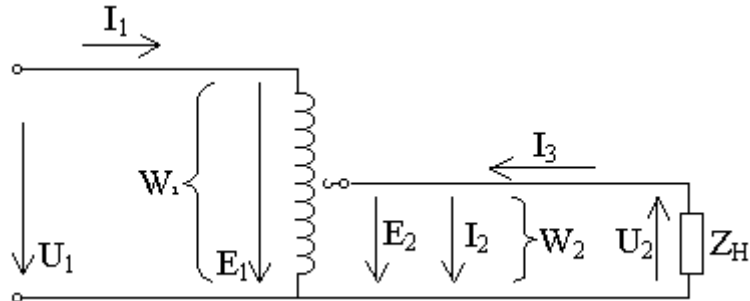


Рис. 10. Схема автотрансформатора

Струм навантаження

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_H}.$$

Струм I_1 визначається з рівняння МРС

$$I_1 W_1 + I_2 W_2 = I_{1x} W_1.$$

Якщо зневажити струмом холостого ходу, а це не вносить істотних похибок, то для АТ одержимо

$$I_1 (W_1 - W_2) + I_2 W_2 = 0.$$

По 1-му закону Кірхгофа:

$$I_2 = I_1 + I_3.$$

Тоді

$$I_1 (W_1 + W_2) + I_1 W_2 + I_3 W_2 = 0;$$

$$I_1 = -I_3 \frac{W_2}{W_1}.$$

Діючи значення струму I_1

$$I_1 = I_2 \frac{W_2}{W_1}.$$

Струм I_2 дорівнює

$$I_2 = I_1 \frac{W_1 - W_2}{W_2} = -I_3 \frac{W_2}{W_1} \left(\frac{W_1 - W_2}{W_2} \right) = -I_3 \frac{W_1 - W_2}{W_1}.$$

Автотрансформатори краще використовувати при малих коефіцієнтах трансформації ($k \leq 2$). При використанні автотрансформатора на виготовлення обмотки потрібно значно менше (по масі) дроту, чим на виготовлення двухобмоточного трансформатора (при $k=2$ приблизно в 2 рази), а також знижується маса магнітопровода. Однак автотрансформатор не можна застосовувати там, де по техніці безпеки неприпустимий гальванічний зв'язок між обмотками. Автотрансформатор часто використовується в лабораторній практиці як регулятор напруги. Такий автотрансформатор має рухливий ковзний контакт, що стосується обмотки, для чого остання позбавлена ізоляції по ходу рухливого ковзного контакту.

9. Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори застосовуються, по-перше, для ізоляції вимірювальних приладів і апаратів автоматичного захисту від кола високої напруги, чим досягається безпека виміру, і, по-друге, для розширення меж виміру вимірювальних приладів.

При використанні вимірювальних трансформаторів вимірювальні прилади й реле захисту підключається до вторинної обмотки, надійно ізолюваної від первинної високовольтної обмотки. Вторинні обмотки виконуються на малі напруги, не небезпечні для обслуговуючого персоналу.

9.1. Трансформатор напруги (ТН)

Первинна обмотка ТН із великою кількістю витків W_1 вмикається в коло, напругу U_1 якого потрібно змінити, а до вторинної обмотки зі значно меншою кількістю витків W_2 – обмотці напруги U_2 приєднуються паралельно один одному вольтметр і коло напруги інших приладів (ваттметра, лічильника й ін.). Один вивід вторинної обмотки й корпус ТН заземлюються на випадок ушкодження ізоляції.

Опір вольтметра і кіл напруги вимірювальних приладів відносно великий (порядку тисяч Ом), тобто ТН працює в умовах, близьких до режиму

XX. Тому спадання напруги на первинній $I_1 Z_1$ і вторинній $I_2 Z_2$ обмотках дуже малі, що дозволяє вважати $U_1 \approx E_{1x}$ і $U_2 \approx E_{2x}$.

Так як

$$\frac{E_{1x}}{E_{2x}} = \frac{W_1}{W_2} = k,$$

де k – коефіцієнт трансформації, то

$$U_1 = kU_2,$$

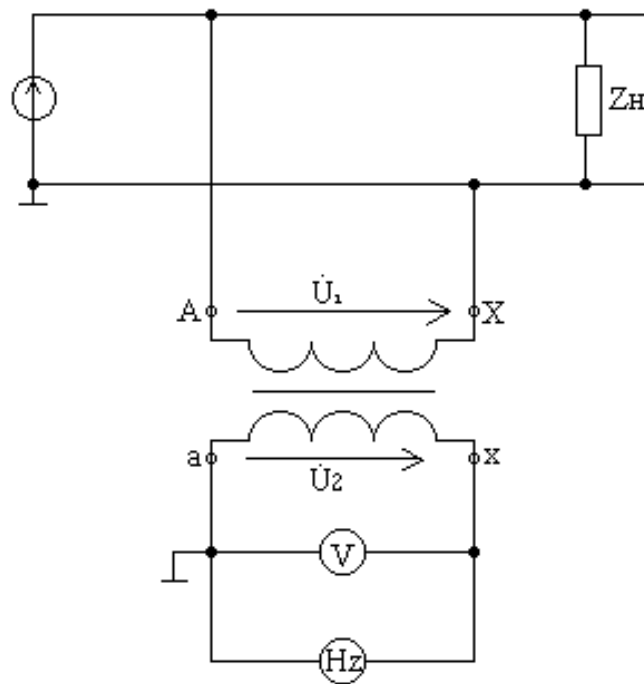


Рис. 11. Схема включення трансформатора напруги

Тобто первинна напруга зв'язана з вторинною постійним співвідношенням. Отже, вимірявши низьку напругу U_2 , можна визначити первинну високу напругу U_1 .

Відношення первинної напруги до вторинної було б постійним, якби спадання напруги на обмотках ТН дорівнювало нулю. У дійсності ці спадання напруги викликають неточності у вимірі напруги – похибку напруги, а у передачі фази – кутову похибку.

Похибка напруги визначається як

$$f_u \% = \frac{U_{\text{визм}} - U_1}{U_1} * 100,$$

де $U_{\text{визм}}$ і U_1 – обмірюване і дійсне значення первинної напруги.

Кутова похибка визначається як кут δ_i між векторами U_1 і U_2 на векторній діаграмі. Вона вимірюється в хвилинах і вважається позитивною, якщо вектор вторинної напруги випереджає вектор первинної напруги.

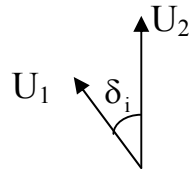


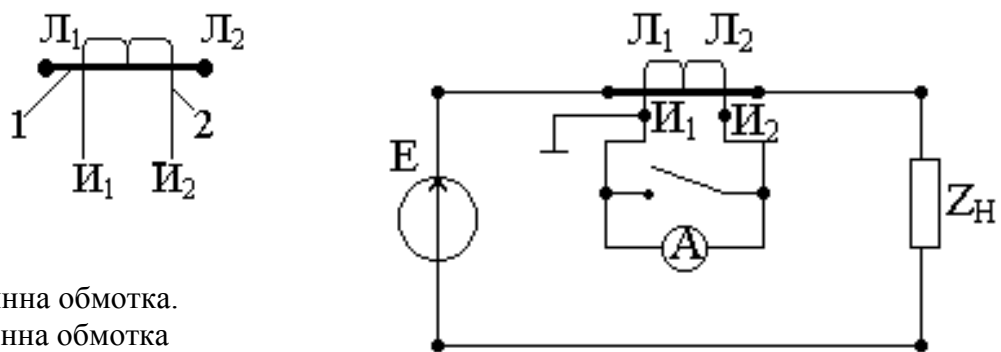
Рис.12. Векторна діаграма

Для напруг до 6 кВ ТН з природним повітряним охолодженням, для напруг від 6 кВ і вище застосовуються масляні ТН.

ТН бувають однофазні і трифазні. На паспорті вказуються: номінальна потужність, номінальна первинна і вторинна $U_{2\text{ном}}$ напруга, клас точності. Вторинна напруга всіх ТН дорівнює 100 В

9.2. Трансформатор струму (ТС)

ТТ із боку первинної обмотки вмикається як амперметр, тобто послідовно з контрольованим об'єктом. Вторинна обмотка замикається безпосередньо на амперметр і коло струму інших вимірювальних приладів.



1 – первинна обмотка.
2 – вторинна обмотка

Рис. 12. Схема включення трансформатор струму

Сумарний опір амперметра і кіл струму вимірювальних приладів малий (< 2 Ом), тому ТС працює в умовах, близьких до режиму КЗ. Напруга вторинної обмотки ТС визначається спаданням напруги на малому опорі кіл вимірювальних приладів і з'єднувальних проводів (звичайно 1-12В). Малий

напрузі вторинної обмотки відповідає мале значення ЕРС E_2 , а отже, і мале значення магнітного потоку в магнітопроводі ТС

$$E_2 = 4,44fw_2\Phi.$$

Для порушення такого магнітного потоку потрібна незначна МДС W_1I_{1x} , тому в рівнянні МДС

$$I_1W_1 + I_2W_2 = I_{1x}W_1$$

цією величиною можна зневажити і вважати

$$I_1W_1 = I_2W_2,$$

Звідси

$$I_1 = \frac{W_2}{W_1} I_2 = \frac{1}{k} I_2$$

Отже, первинний струм можна визначити, змінивши струм у вторинному колі і розділивши його на коефіцієнт трансформації.

Відношення струмів ТС не цілком постійне через вплив МДС $I_{1x}W_1$, що вище не враховувалася. Цей вплив приводить до похибки струму і кутової похибки δ_i .

$$f_i = \frac{I_{1\text{изм}} - I_1}{I_1} 100$$

Отже, первинний струм можна визначити, вимірювши струм у вторинному колі і розділивши його на коефіцієнт трансформації.

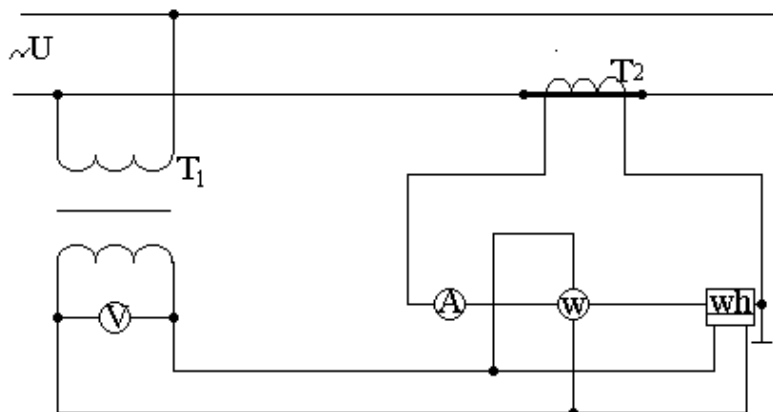


Рис. 13. Схема включення приладів за допомогою вимірювальних трансформаторів:

Первинний струм ТС у багато разів більше вторинного, тому число витків первинної обмотки W_1 , невелике, а вторинної W_2 – у багато разів більше.

У паспорті ТС вказуються номінальні значення $I_{1ном}$ і $I_{2ном}$ (звичайно 5А), клас точності, максимальне значення опору і мінімальне значення коефіцієнта потужності обмоток приладів, що включаються у вторинну обмотку, напругу, на яку розрахована ізоляція ТС.

Лекція №7

СИНХРОННІ ТРИФАЗНІ ГЕНЕРАТОРИ

1. Синхронний генератор, принцип його роботи
2. Робота генератора в режимі холостого ходу
3. Робота синхронного генератора під навантаженням
4. Зовнішні й регульовальні характеристики синхронного генератора

1. Синхронний генератор, принцип його роботи

Синхронні генератори використовуються як джерела трифазного змінного струму. Вони встановлюються на електростанціях – теплових, гідравлічних і атомних, а також на пересувних установках – тепловозах, автомобілях, дизель-електростанціях і т.д.

Синхронна машина є машиною змінного струму, нерухома частина машини (статор) складається зі сталевого чи чавунного корпусу, у якому закріплений циліндричний сердечник статора. У пазах сердечника прокладена трифазна обмотка. Сердечник статора в сукупності з обмоткою статора називається якорем машини. У підшипникових щитах, прикріплених із торцевих сторін до корпусу, розташовані підшипники, що підтримують вал обертової частини машини – ротора чи індуктора. На валу розміщений циліндричний сердечник ротора. У пазах сердечника ротора покладена обмотка збудження генератора. Кінці цієї обмотки приєднані до ізольованих один від одного контактних кілець, на які спираються нерухомі графітні щітки. Через кільця і щітки від стороннього джерела до обмотки збудження підводиться постійний струм – струм збудження генератора. Існують дві різні конструкції ротора: явно полюсний та неявнополюсний (рис. 1).

Вал синхронного генератора, на якому закріплений ротор, приводиться в рух первинним двигуном. Первинним двигуном потужних генераторів служать гідротурбіни, рідше – двигуни внутрішнього згорання.

Синхронний генератор працює в такий спосіб (рис.2). Якщо обмотку збудження генератора підключити до джерела постійного струму, то струм збудження I_z , що протікає по ній, створює основний магнітний потік Φ_z , силові лінії якого замикаються по ротору, повітряному зазору і статору. При обертанні ротора за допомогою первинного двигуна магнітне поле буде також обертатися.

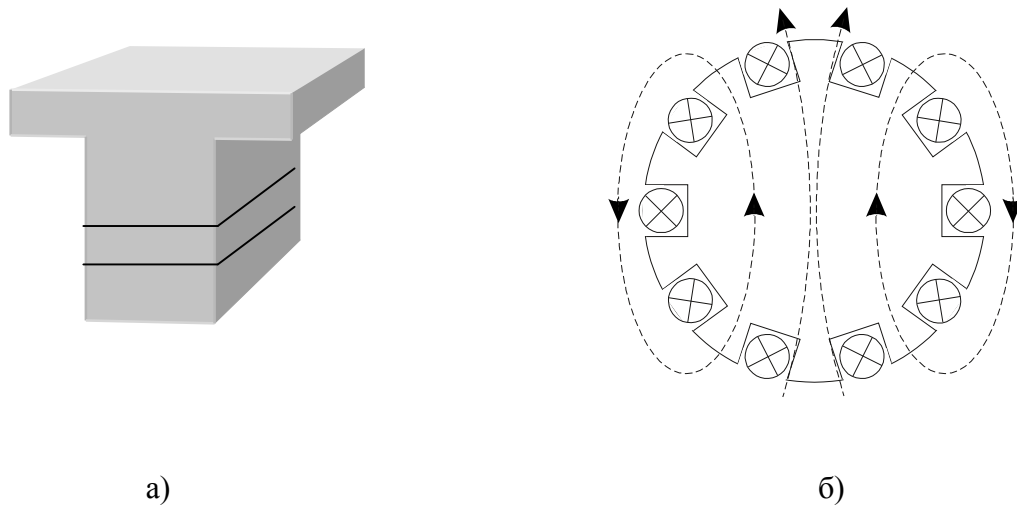


Рис. 1. Ротори синхронного генератора : а - явнополюсний, б – неявно-полюсний

Оскільки котушки фаз обмотки мають однакові числа витків обмотки і зміщені в просторі відносно один одного на 120° , то при обертанні магнітного поля в трьох фазах будуть індукуватися ЕРС, однакові по амплітуді і частоті, але зрушені по фазі відносно один одного також на 120° .

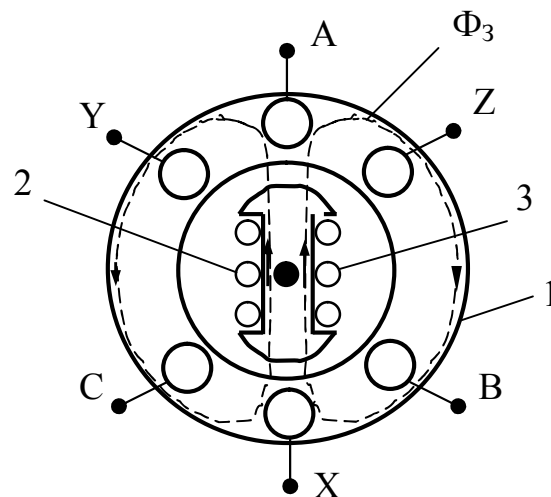


Рис. 2. Конструкція синхронного генератора: 1-статор, 2-ротор, 3-обмотка збудження

Частота синусоїдальної ЕРС, індукованої у фазі обмотки якоря, дорівнює

$$f = \frac{pn}{60},$$

де p – число пар полюсів, n – частота обертання ротора.

Для одержання стандартної частоти 50 Гц при різних частотах обертання синхронні генератори виготовляються з різним числом пар полюсів. Так, турбогенератори виготовляються на частоту обертання 3000 об./хв., і мають одну пару полюсів ($p = 1$). Частота обертання гідрогенераторів визначається в основному висотою напору води і для різних станцій лежить у межах від 50 до 750 об./хв., що відповідає числам пар полюсів від 60 до 4.

2. Робота генератора в режимі холостого ходу

У режимі холостого ходу коло обмотки статора розімкнуте, тобто $I_{ст}=0$ (рис.3).

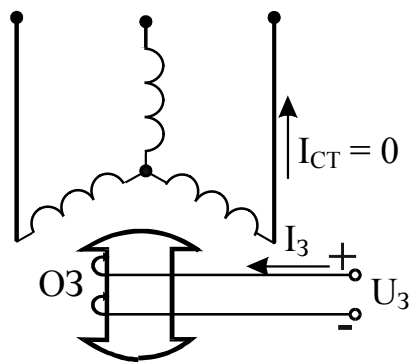


Рис.3. Робота генератора в режимі холостого ходу

Струм збудження генератора $I_з$ створює магнітний потік збудження $\Phi_з$ згідно кривої намагнічування (рис. 4).

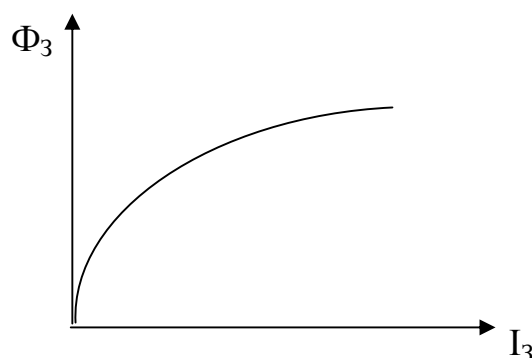


Рис.4. Крива намагнічування

Ротор синхронного генератора обертається з постійною швидкістю $n=\text{const}$. Струм збудження $I_з$, що надходить у коло ротора від джерела постійного струму, може регулюватися від нуля до деякого максимального

значення. Це дозволяє змінювати максимальний струм ротора в широких межах, тобто одержувати різну величину ЕРС статора, тому що ЕРС є функцією магнітного потоку ротора

$$E = K_E n \Phi_3,$$

де K_E - коефіцієнт пропорційності, n - частота обертання ротора, Φ_3 - магнітний струм ротора при струмі збудження I_3 .

Залежність $E = f(I_3)$ при $n = \text{const}$; $I_{\text{ст}} = 0$ називається характеристикою холостого ходу генератора (рис.5).

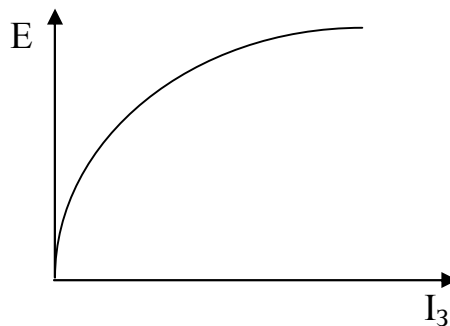


Рис. 5. Характеристика холостого ходу

3. Робота синхронного генератора під навантаженням

При увімкненому навантаженні з опором Z_H під дією індукованої в обмотці статора трифазної системи ЕРС в обмотці статора з'являється трифазна система струму статора: генератор починає віддавати приймачу електроенергію (рис.6).

При симетричному навантаженні Z_H струм кожної фази статора (напрямок "А") визначається залежністю

$$I_A = \frac{E_A}{Z_H}$$

Кут зсуву фаз між струмом і ЕРС фази визначається характером навантаження Z_H . Наприклад, для активно-індуктивного навантаження векторна діаграма ЕРС і струмів трифазної обмотки статора має вигляд, на рис.7.

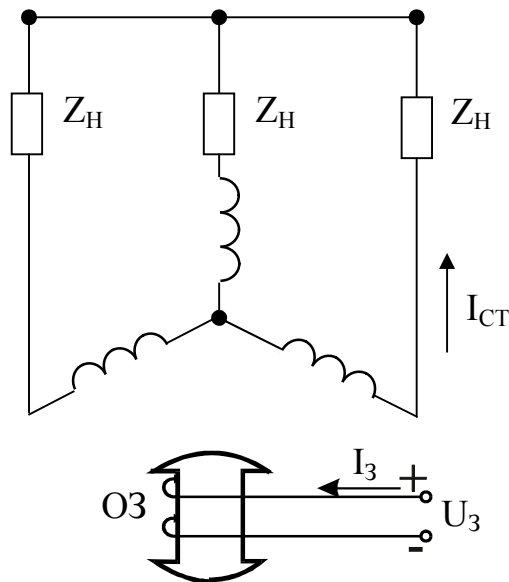


Рис. 6. Робота синхронного генератора під навантаженням

Струм, що протікає по обмотці статора, створює обертове магнітне поле якоря, що характеризується магнітним потоком $\Phi_{\text{я}}$, частота обертання якого дорівнює частоті обертання ротора. Взаємне розташування осей магнітних полів якоря й ротора при заданому навантаженні генератора залишається незмінним. Під дією поля якоря результуюче поле генератора при зменшенні його навантаження буде також змінюватися, що впливає на значення напруги генератора. Вплив поля якоря на результуюче поле машини називається реакцією якоря, а магнітний потік $\Phi_{\text{я}}$ – потоком реакції якоря.

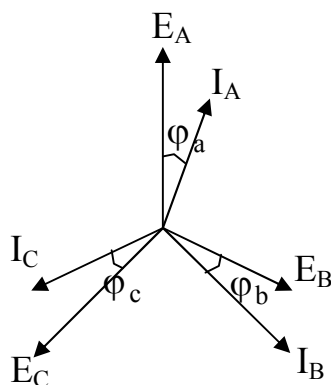


Рис.7. Векторна діаграма ЕРС і струмів

У такий спосіб у навантаженому синхронному генераторі існують два магнітних потоки – основний магнітний потік збудження Φ_3 , створений струмом обмотки збудження I_3 , і магнітний потік реакції якоря $\Phi_{\text{я}}$, створений струмом I_{CT} трифазної обмотки статора. Потоки Φ_3 і $\Phi_{\text{я}}$ обертаються з однаковою швидкістю, тобто вони нерухомі відносно один одного.

Результуючий потік генератора дорівнює

$$\bar{\Phi}_{\text{PE3}} = \bar{\Phi}_{\text{B}} + \bar{\Phi}_{\text{Я}}.$$

Потік Φ_3 залежить від струму $I_{\text{Я}}$. Потік реакції якоря пропорційний струму статора $I_{\text{СТ}}$

$$\Phi_{\text{Я}} = K \cdot I_{\text{СТ}},$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

При зміні струму статора $I_{\text{СТ}}$ змінюється результуючий потік Φ_{PE3} , що викликає відповідні зміни в ЕРС генератора

$$E_{\text{PE3}} = K_e n \Phi_{\text{PE3}},$$

тобто потік реакції Φ_{PE3} впливає на зовнішні й регулювальні характеристики синхронного генератора.

4. Зовнішні й регулювальні характеристики синхронного генератора

Зовнішня характеристика синхронного генератора показує, як змінюється величина напруги на затискачах обмоток статора при незмінному струмі збудження в залежності від струму статора

$$U = f(I_{\text{СТ}})$$

при $n = \text{const}$ і $I_3 = \text{const}$ при різних навантаженнях.

Розглянемо роботу генератора на індуктивне навантаження, коли

$$Z_{\text{H}} = X_{\text{L}} = \omega L.$$

При індуктивному навантаженні потік реакції якоря, створений струмом статора $I_{\text{СТ}}$, спрямований назустріч основному магнітному потоку Φ_3 , тобто є таким, що розмагнічує, тому результуючий потік дорівнює

$$\Phi_{\text{PE3}} = \Phi_3 - \Phi_{\text{Я}} = \Phi_3 - KI_{\text{СТ}}.$$

З ростом струму $I_{\text{СТ}}$ проходить розмагнічування генератора магнітним потоком реакції якоря $\Phi_{\text{Я}}$, що викликає зниження ЕРС генератора E .

Напруга на затискачах генератора дорівнює

$$U = E_{\text{РЕЗ}} - I_{\text{СТ}} Z_{\text{СТ}},$$

де $Z_{\text{СТ}}$ – опір обмотки статора;

$I_{\text{СТ}} Z_{\text{СТ}}$ – падіння напруги в обмотці статора.

Звичайно $Z_{\text{СТ}}$ має невелике значення, тому $U \approx E$. Зовнішня характеристика при індуктивному навантаженні має вигляд як на рис.8 (крива 1).

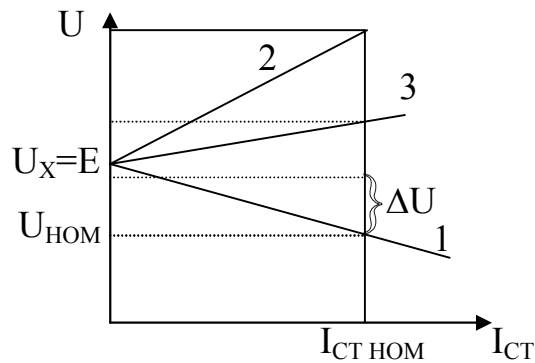


Рис.8. Зовнішня характеристика : 1- при індуктивному навантаженні; 2- при ємнісному навантаженні; 3- активному навантаженні.

При цьому

$$\Phi_{\text{РЕЗ}} = \Phi_3 + \Phi_{\text{Я}} = \Phi_3 + K I_{\text{СТ}}.$$

З ростом струму статора результуючий потік зростає, що викликає збільшення ЕРС генератора.

При активному характері навантаження $Z_{\text{Н}} R$ вісь потоку $\Phi_{\text{Я}}$ перпендикулярна осі потоку Φ_3 (рис.50, крива 3).

Зміна напруги генератора при номінальному струмі навантаження дорівнює

$$\Delta U = \frac{U_{\text{X}} - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%,$$

де U_{X} – напруга холостого ходу; $U_{\text{НОМ}}$ – напруга при номінальному струмі.

Зміна напруги порівняно велика через значну реакцію якоря – до декількох десятків відсотків. Напруга може бути більш стабільною, якщо при зменшенні навантаження, а отже струму $I_{\text{СТ}}$, одночасно змінювати магнітний потік ротора Φ_3 , регулюючи струм I_3 .

Регулювальні характеристики (рис.9) показують, як при змінах $I_{\text{СТ}}$ потрібно регулювати I_3 , щоб підтримувати на виході напругу $U = \text{const}$, тобто

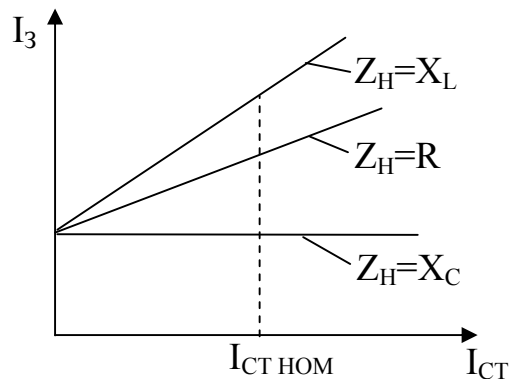
$$I_3 = f(I_{CT})$$

при $n = \text{const}$, $U = \text{const}$.

При індуктивному навантаженні, коли потік $\Phi_{\text{я}}$ розмагнічує генератор, необхідно для підтримки $U = \text{const}$ збільшувати струм збудження I_3 по мірі зростання статора I_{CT} .

При ємнісному навантаженні, коли потік $\Phi_{\text{я}}$ намагнічує генератор, необхідно знижувати I_3 по мірі зростання I_{CT} . При активному навантаженні струм збудження I_3 по мірі зростання I_{CT} необхідно збільшувати значно менше, ніж при індуктивному навантаженні.

Для нормальних умов роботи приймачів електричної енергії необхідно підтримувати напругу й частоту генератора на заданих рівнях. Для цього синхронні генератори забезпечуються в більшості випадків регуляторами, що керують напругами і частотою обертання генераторів і, що впливають на струм збудження генераторів і момент первинного двигуна.



Лекція № 8

Трифазні асинхронні двигуни

1. Призначення, будова і принцип дії
2. Основні співвідношення в асинхронному двигуні
3. Обертаючий момент і механічна характеристика асинхронного двигуна
4. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна

1. Призначення, будова і принцип дії

Трифазні асинхронні двигуни є основними перетворювачами електричної енергії у механічну. Основними перевагами цих машин є

простота влаштування, висока надійність в експлуатації, порівняно низька вартість.

Двигун має дві основні частини: нерухому – статор, і ту, що обертається – ротор. Статор складається з корпусу, який виконується зі сталі, чавуна чи алюмінію. У корпус статора вмонтований сердечник статора, який представляє собою порожній циліндр, на внутрішній поверхні якого маються пази з трифазною обмоткою статора. Сердечник виготовлений з феромагнітного матеріалу. Для зменшення вихрових струмів сердечник збирають з окремих листів електротехнічної сталі, покритих лаком. Обмотка статора виконується з ізольованого мідного дроту круглого чи прямокутного перерізу.

Обмотка складається з трьох окремих котушок (фаз), з'єднаних між собою зіркою або трикутником. Початок обмоток позначаються на схемі буквами А, В, С, кінці обмотки - Х, Y, Z. Обмотки двигунів малої і середньої потужності виготовляють на напругу 380/220, 220/127 В у чисельнику при з'єднанні зіркою, у знаменнику трикутником. Існують двигуни на 500, 660 і 1140 В. Двигуни високої напруги – на 3000 і 6000 В.

Сердечник ротора являє собою циліндр, зібраний також із листів електротехнічної сталі, у якому маються пази з обмоткою ротора. Обмотки ротора бувають двох видів: короткозамкнені й фазні. Короткозамкнута обмотка складається зі стрижнів, розташованих у пазах, і замикаючих кілець (типу “більча клітка”).

Фазну обмотку виконують так само, як і обмотку статора. Вона завжди з'єднується зіркою. Початки фаз обмотки приєднують до контактних кілець, розташованих на валу двигуна. Кільця ізольовані один від одного, а також від вала двигуна. До кілець притискаються пружинами щітки, розташовані в нерухомих щіткотримачах. За допомогою контактних кілець і щіток у коло ротора вмикається додатковий резистор, що є пусковим (для збільшення пускового моменту й одночасного зменшення пускового струму) або регульовальним (для зменшення частоти обертання ротора двигуна). Вал ротора обертається в підшипниках, що закріплені в підшипникових щитах, прикріплених до корпусу болтами. Для збільшення тепловіддачі ротор забезпечений крильчаткою, прикріпленою до замикаючого кільця короткозамкненої обмотки.

Принцип роботи асинхронного двигуна заснований на використанні обертового магнітного потоку (рис.1).

До трифазної обмотки статора підводиться трифазний змінний струм. Кожна фаза статора створює свій магнітний потік, величина якого пропорційна струму. Оскільки фази обмотки статора мають однакову кількість витків і розташовані симетрично по периметру статора, то струми в них рівні по амплітуді і зсунуті в часі відносно один одного на 120° . Відповідно магнітні потоки, створені цими струмами, теж зрушені на 120° .

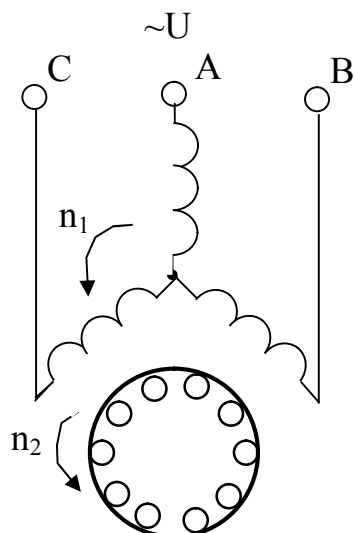


Рис.1. Електрична схема асинхронного двигуна

Магнітні потоки трьох фаз складаються геометрично, виникає результуючий магнітний потік, що також змінюється по синусоїдальному закону, має постійну в часі амплітуду, що більше амплітуди потоку однієї фази в 1,5 рази, і обертається в просторі з постійною швидкістю. Цей результуючий обертовий магнітний потік замикається по статору, повітряному зазору і ротору.

Обертовий магнітний потік перетинає провідники обмотки ротора й індукує у ній ЕРС. Оскільки обмотка ротора замкнута, ЕРС викликає в ній струм.

У результаті взаємодії струму ротора з обертовим магнітним потоком на підставі закону Ампера виникає сила, що діє на провідники ротора

$$F = BLi,$$

де B – магнітна індукція;
 L – активна довжина провідника;
 i – струм у провіднику ротора.

Сила створює момент, що діє в ту ж сторону. Під дією моменту ротор починає обертатися в тому ж напрямку, що і магнітне поле, із трохи меншою частотою обертання

$$n_2 = (0.92 - 0.98) \cdot n_1.$$

Оскільки $n_2 < n_1$, двигун називається асинхронним. У режимі ідеального холостого ходу магнітне поле і ротор обертаються синхронно, $n_2 = n_1$. У цьому режимі обертовий потік не перетинає провідники ротора – тому ЕРС і струм дорівнюють нулю, тобто не виникає сили F і обертаючого моменту.

Але навіть при роботі двигуна без зовнішнього навантаження необхідно переборювати момент опору від сил тертя і т.д. – тому в асинхронному двигуні завжди $n_2 < n_1$.

2. Основні співвідношення в асинхронному двигуні

Магнітний потік статора обертається зі швидкістю

$$n_1 = \frac{60f_1}{p},$$

де f_1 – частота змінного струму, підведеного до статора;
 p – число пар полюсів магнітного потоку статора.

Частота обертання магнітних полів усіх двох полюсних асинхронних двигунів, увімкнених у промислову мережу, складає

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{p} = 3000 \frac{\text{об.}}{\text{хв}}.$$

Двигуни випускаються не тільки з двома, але і з чотирма, шістьма, вісьмома і т.д. полюсами; у загальному випадку вони мають p пар полюсів. Обмотка кожної фази статора таких двигунів складається з декількох частин, що з'єднуються між собою паралельно чи послідовно. Таким чином домагаються різної частоти обертання двигунів.

$$p = 2 \Rightarrow n_1 = 1500 \frac{\text{об.}}{\text{хв}};$$

$$p = 3 \Rightarrow n_1 = 1000 \frac{\text{об.}}{\text{хв}} \text{ і т.д.}$$

Оскільки ротор обертається з частотою n_2 у ту ж сторону, що і магнітне поле, те обертовий магнітний потік перетинає провідники обмотки зі швидкістю $(n_1 - n_2)$. Цю швидкість прийнято виражати у відносних величинах

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

де S – ковзання.

Ковзання – величина безрозмірна, яка представляє собою частоту обертання ротора відносно поля статора, виражену в частках частоти обертання поля статора.

У момент пуску, коли ротор нерухомий ($n_2 = 0$), ковзання дорівнює $S = 1$, тобто ковзання максимальне. В міру розгону двигуна, коли n_2 збільшується та наближається до n_1 , ковзання дорівнює нулю $S = 0$.

Частота струму статора пропорційна частоті обертання магнітного поля

$$f_1 = \frac{n_0 p}{60}.$$

Оскільки ротор обертається в напрямку магнітного поля, частота перетинання його обмотки магнітним полем буде визначатися різницею частот обертання магнітного поля і ротора. Тому можна записати

$$f_2 = \frac{(n_1 - n_2)p}{60}.$$

Покажемо, в якій залежності знаходяться частоти струму ротора й статора.

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{n_1}{n_1 - n_2};$$

$$f_2 = \frac{f_1(n_1 - n_2)}{n_1} = f_1 S.$$

З цих співвідношень можна зробити висновок, що частота f_2 пропорційна ковзанню.

Магнітний потік Φ індукуює в обмотці ротора ЕРС

$$E_2 = E \cdot K_E \cdot \Phi(n_1 - n_2)$$

чи

$$E_2 = K_E \Phi \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot n_1 = K_E \cdot \Phi \cdot n_1 \cdot S$$

де K_E – коефіцієнт пропорційності.

У момент пуску частота $n_2=0$ і $S = 1$, ЕРС ротора максимальна

$$E_{20} = K_E \cdot \Phi \cdot n_1.$$

З цих співвідношень одержимо

$$E_2 = E_{20} \cdot S,$$

тобто ЕРС ротора пропорційна ковзанню.

Частота індукованої у роторі ЕРС також пропорційна ковзанню (як було показано раніше)

$$E_2 = E_{20} \cdot S,$$

де E_{20} – частота при нерухомому роторі, тобто в момент пуску ($n_2=0$, $S=1$).
Струм ротора визначається законом Ома

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2},$$

де Z_2 – повний опір обмотки ротора.
Обмотка ротора має активну складову R_2 та індуктивну складову

$$X_2 = W_2 \cdot L_2 = W_{20} \cdot L_2 \cdot S;$$
$$W_2 = 2n \cdot f_2,$$

де $W_{20} = 2n \cdot f_{20} \cdot L_2$ – індуктивність розсіювання обмотки ротора.
У момент пуску, коли $S = 1$, індуктивний опір ротора максимальний

$$X_{20} = W_{20} \cdot L_2,$$

тобто

$$X_2 = X_{20} \cdot S,$$

Таким чином, індуктивний опір ротора пропорційний ковзанню.
Повний опір обмотки ротора

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{R_2^2 + (X_{20} \cdot S)^2}.$$

Тоді вираз для струму обмотки ротора має вигляд

$$I_2 = \frac{E_{20} \cdot S}{\sqrt{R_2^2 + (X_{20} \cdot S)^2}}.$$

У момент пуску й у процесі розгону асинхронного двигуна має місце співвідношення

$$X_{20} S \gg R_2.$$

При цьому струм ротора визначається наближеною залежністю

$$I_2 = \frac{E_{20} \cdot S}{X_{20} \cdot S} = \frac{E_{20}}{X_{20}}.$$

Тобто струм ротора практично постійний і не залежить від ковзання.

Наприкінці процесу розгону, при малих ковзаннях S , справедлива нерівність

$$X_{20} \cdot S < R_2,$$

При цьому струм ротора зменшується пропорційно ковзанню S . На графіку залежності (рис.2) $I_2 = f(n_2)$ ділянка АВ близька до вертикальної, вона відповідає періоду пуску і розгону двигуна.

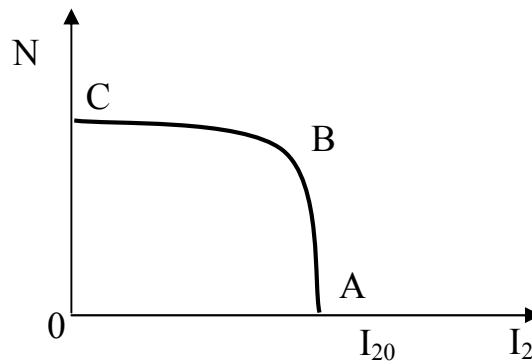


Рис. 2. Графік залежності $I_2=f(n_2)$

Струм статора змінюється практично по такому ж закону, що і струм ротора. Істотним недоліком асинхронного двигуна є великий пусковий струм статора I_{10} , який може перевищувати номінальне значення в 4 – 7 разів.

3. Обертаючий момент і механічна характеристика асинхронного двигуна

Обертаючий момент асинхронного двигуна визначається рівнянням

$$M = K_M \Phi I_2 \cdot \cos \varphi_2,$$

- де K_M – коефіцієнт пропорційності;
 Φ – обертовий магнітний потік;
 I_2 – струм ротора;
 φ_2 – кут зсуву фаз між ЕРС E_2 і струмом I_2 ротора;

$$\cos \varphi = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (X_{20} \cdot S)^2}}.$$

Пусковий момент двигуна

$$M_0 = K_M M \Phi_{20} \cos \varphi_{20}.$$

Асинхронний двигун має малий пусковий момент, незважаючи на великий пусковий струм ротора I_{20} , що обумовлений великим індуктивним опором X_{20} , тобто низьким значенням $\cos \varphi_{20}$, тому що

$$\cos \varphi_{20} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}}.$$

Момент M_0 складає лише 0,8 – 1,2 від номінального моменту M_H , що є другим істотним недоліком асинхронного двигуна.

Потім, по мірі розгону двигуна струм I_2 практично не зменшується (рис.53, ділянка АВ), а індуктивний опір $X_2 = X_{20}S$ зменшується пропорційно ковзанню. Тому φ_2 зменшується, $\cos \varphi_2$ збільшується і момент M також зростає.

Залежність між обертаючим моментом і швидкістю обертання двигуна $M=f(n_2)$ називається механічною характеристикою двигуна. (рис.3).

Ділянка АВ відповідає ділянці АВ попереднього графіка, ділянка ВС – ділянці ВС.

Характерними точками механічної характеристики асинхронного двигуна є:

1. M_0 – пусковий момент;
2. $n_{2x} = n_1$ – частота ідеального холостого ходу;
3. $M_H; n_{2H}$ – момент і частота оборотів у точці номінального режиму;
4. $M_{кр}$ – максимальний чи критичний момент, який характеризує здатність асинхронного двигуна до перевантажень. Звичайно вважають, що

$$M_{кр} = (1,8 - 2,2) M_H.$$

На ділянці ВС двигун працює стійко. Якщо ж момент сил опору (навантаження) перевищить критичний момент $M_{кр}$, відбувається перекидання асинхронного двигуна, тобто асинхронний двигун встановлюється під напругою. Режим перекидання дуже небезпечний, тому що під дією значних пускових струмів двигун швидко перегрівается і виходить з ладу.

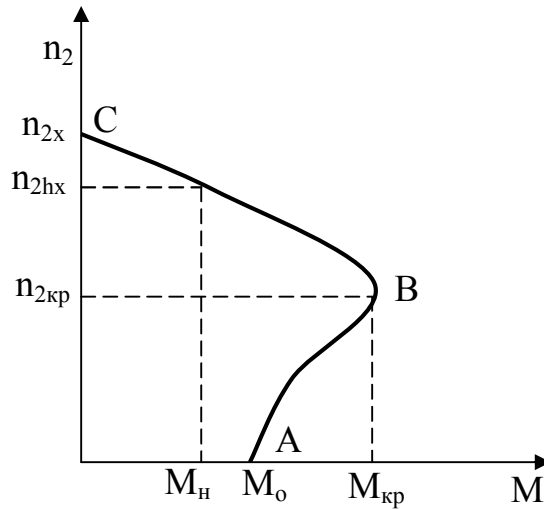


Рис.3. Механічна характеристика асинхронного двигуна

Механічна характеристика асинхронного двигуна описується рівнянням

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}},$$

де $S_{кр} = \frac{n_1 - n_{кр}}{n_1}$ - критичне ковзання;

$n_{кр}$ - частота обертання двигуна при моменті $M_{кр}$.

4. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна

Частота обертання ротора асинхронного двигуна дорівнює

$$n_2 = n_1(1 - S),$$

де n_1 - визначається рівністю

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Таким чином,

$$n_2 = \frac{60f_1}{p(1 - S)}.$$

З цього виразу випливає, що частоту обертання ротора асинхронного двигуна можна регулювати трьома способами:

1. Зміною числа пар полюсів магнітного потоку статора “р”;
2. Зміною частоти напруги живильної мережі f_1 ;
3. Зміною ковзання (реостатний спосіб).

Регулювання частоти обертання зміною числа пар полюсів p забезпечує дискретну зміну n_2 . Випускаються спеціальні багатошвидкісні асинхронні двигуни – двох-, трьох-, і чотиришвидкісні. Кожна фаза обмотки статора багатошвидкісного асинхронного двигуна виконана з окремих секцій. При зміні схеми їхнього включення змінюється число пар полюсів.

При регулюванні частоти f_1 обмотка статора асинхронного двигуна отримує живлення від перетворювача частоти. На сьогоднішній день для цієї мети використовуються перетворювачі частоти, виготовлені на напівпровідникових керованих вентилях – тиристорах.

Для підтримки незмінної величини магнітного потоку Φ одночасно зі зниженням частоти f_1 знижують напругу U_1 на обмотках статора асинхронного двигуна, підтримуючи незмінне відношення

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}.$$

Цей спосіб дозволяє одержати широкий діапазон і плавне регулювання частоти обертання асинхронного двигуна.

Реостатний спосіб застосовуємо тільки для асинхронних двигунів з фазним ротором. У коло обмотки ротора вмикається регульовальний реостат (рис.4,а). Механічна характеристика змінюється в залежності від величини додаткового опору (рис.4,б). Чим більше r_p , тим нижче розташована механічна характеристика.

При достатній кількості ступенів реостата досягається плавне регулювання частоти в широких межах. При роботі над кожною з характеристик установлюється таке значення $n_{уст}$, при якому момент асинхронного двигуна стає рівномірним моменту навантаження M_n .

Перевагою методу є його простота. Недоліками є значні втрати енергії в додатковому опорі кола ротора, не можна регулювати частоту при малих моментах навантаження, тому що механічні характеристики (при різних r_p) сходяться в одній точці n_{2x} .

Нижче на рисунку 4 приведена схема включення електричних елементів при реостатному способі регулювання і механічна характеристика АД.

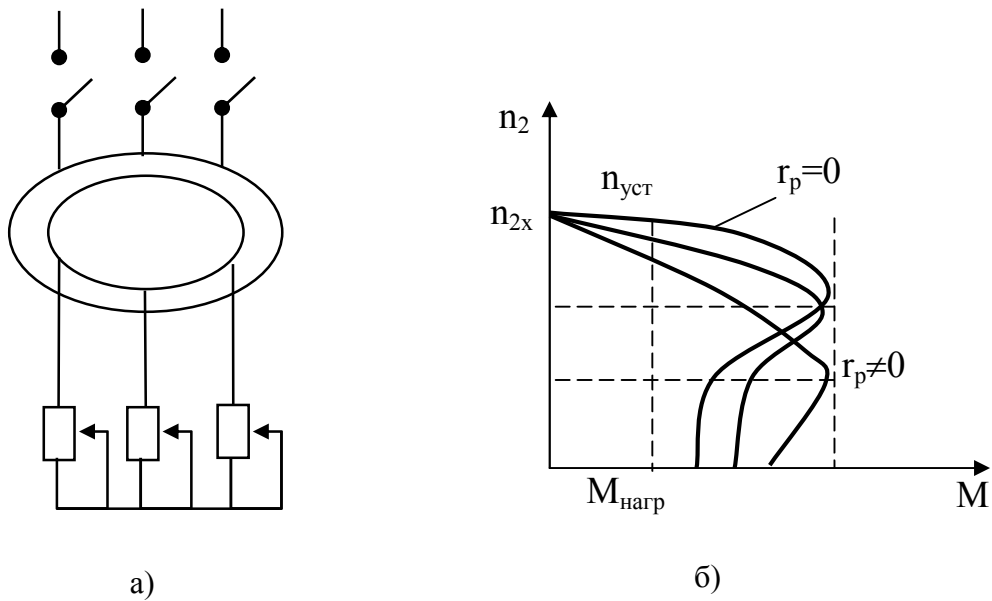


Рис.4. Реостатний спосіб регулювання частоти обертання ротора асинхронного двигуна

а – включення реостату в коло; б - механічні характеристики

ЛЕКЦІЯ №9

МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. Призначення і принцип дії генератора та двигунів постійного струму
2. Способи збудження генераторів постійного струму
3. Основні співвідношення в двигуні постійного струму незалежного збудження і його механічна характеристика
4. Пуски та регулювання частоти оборотів двигунів постійного струму
5. Двигуни постійного струму послідовного збудження

1. Призначення і принцип дії генератора та двигунів постійного струму

Машины постійного струму застосовують як електродвигуни і як генератори. Електричні двигуни постійного струму мають цінні властивості – вони допускають регулювання швидкості в широких межах, мають значну перевантажувальну здатність. Їх широко застосовують для приводів будівельних, дорожніх і підйомно-транспортних машин – в екскаваторах,

кранах, а також в електромобілях, металорізальних верстатах, маніпуляторах, роботах і т.д.

Генератори постійного струму застосовуються як джерело постійного струму для живлення електролізних і гальванічних ванн, для зарядки акумуляторних батарей, для живлення двигунів постійного струму. Однак на сьогоднішній день генератори постійного струму усе більше витісняються напівпровідниковими тиристорними перетворювачами, а також синхронними генераторами, що працюють разом із напівпровідниковими випрямлячами.

Конструкція машини постійного струму (генератор і двигун влаштовані однаково) складається зі статора, полюсів, полюсних наконечників, обмотки збудження, якоря, обмотки якоря, колектора, щіток. Статор, полюси, полюсні наконечники та якір утворюють магнітне коло, по якому замикається магнітний потік збудження генератора Φ . Цей потік створюється постійним струмом збудження, що протікає по обмотці збудження. Полюсні наконечники забезпечують рівномірний розподіл по струму уздовж окружності якоря. У пазах якоря прокладена обмотка якоря. Провідники обмотки якоря з'єднуються по спеціальній замкнутій схемі і приєднуються до колектора. Колектор складається з окремих мідних пластин, ізольованих між собою. На колектор спираються графітні щітки. Колектор і щітки – це механічний випрямляч, що перетворює струм провідників обмотки якоря, який змінюється по напрямку, в постійний струм – у генераторі (або навпаки – у двигуні).

Розглянемо принцип роботи генератора. Його електрична схема наведена на рис.1. Якір генератора приводиться в обертання первинним двигуном. Механічна енергія, що надходить від цього двигуна, перетворюється в електричну енергію постійного струму, що виробляється в обмотці якоря. До обмотки збудження ОЗ від стороннього джерела підводиться постійний струм.

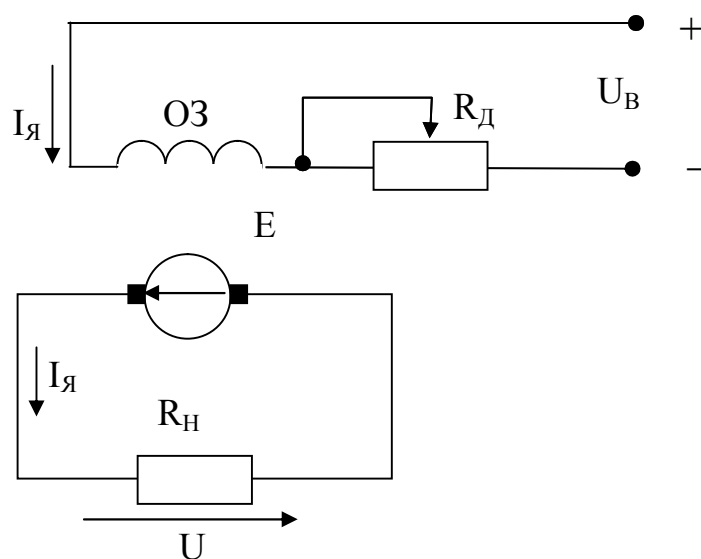


Рис.1. Електрична схема генератора постійного струму незалежного збудження

Цей струм створює магнітний потік збудження, який замикається по полюсах, полюсним наконечникам, повітряному зазору, якорю й статору. Потік перетинає провідники обмотки обертового якоря, при цьому в кожному провіднику індукуються ЕРС

$$E_{\text{пров}} = Blv,$$

де B – магнітна індукція;
 l – активна довжина провідника;
 v – швидкість руху провідника в магнітному полі.

Кожен провідник якоря по черзі попадає то під південний, то під північний полюс по струму Φ - тому в кожному провіднику індукуються ЕРС, що періодично змінює напрямок. Однак колектор і щітки випрямляють ЕРС обмотки якоря, із щіток генератора знімається постійна (випрямлена) напруга. Потужність, споживана обмоткою збудження, складає усього кілька відсотків (або навіть частки відсотків) від потужності, що виробляє генератор. ЕРС групи складають з послідовно з'єднаних провідників, і з щіток генератора знімається ЕРС.

$$E = K_E n \Phi_B,$$

де K_E – коефіцієнт пропорційності;
 n – частота обертання первинного двигуна.

На рис.2 наведена електрична схема двигуна постійного струму. Розглянемо принцип роботи двигуна. До обмотки збудження ОЗ від стороннього джерела підводиться струм, що створює магнітний потік збудження (аналогічно генератору) . До якоря двигуна підводиться постійна напруга U , під дією якої в замкнутій обмотці якоря протікає струм

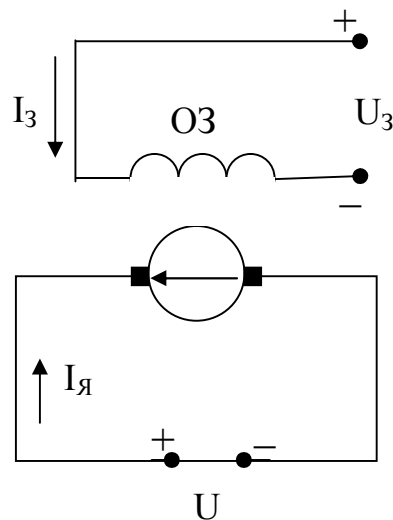


Рис.2. Електрична схема двигуна постійного струму

Кожен провідник якоря – це провідник зі струмом, що знаходиться в магнітному полі. Тому на кожен провідник діє механічна сила.

Ці сили створюють обертаючий момент

$$M = K_M \Phi_3 I_{я},$$

де K_M – коефіцієнт пропорційності.

Якір двигуна починає обертатися. Електрична енергія, яку якір двигуна споживає з мережі, перетвориться в механічну енергію, яка через вал двигуна передається механізму.

2. Способи збудження генераторів постійного струму

В залежності від способу підключення обмотки збудження розрізняють генератори незалежного, паралельного і змішаного збудження.

У генераторі незалежного збудження (рис.1) обмотка збудження ОЗ одержує живлення від незалежного джерела постійного струму. Струм збудження створює магнітний потік збудження відповідно до кривої намагнічування (рис.3). На ділянці АВ магнітна система не насичена. В області ВС відбувається насичення феромагнітних деталей магнітного кола генератора.

Якір генератора обертається звичайно, із незмінною швидкістю n . При цьому ЕРС генератора E регулюють зміною потоку збудження, для чого змінюють струм збудження генератора за допомогою опору R_d (рис.1).

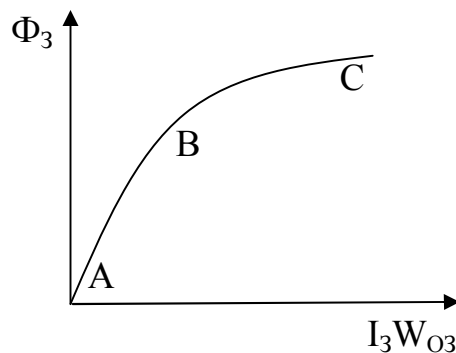


Рис.3. Крива намагнічування

Залежність ЕРС генератора E від струму збудження при $n = \text{const}$ та роботі генератора в режимі холостого ходу, тобто залежність

$$E = f(I_B).$$

При $n=\text{const}$, $I_{\text{я}}=0$ називається характеристикою холостого ходу генератора. Ця характеристика має форму, подібну кривій намагнічування (рис.4).

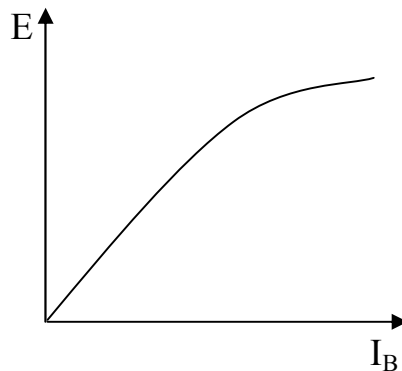


Рис.4. Характеристика холостого ходу

У генераторі паралельного збудження (рис.5) обмотка збудження ОЗ одержує живлення від якоря самого генератора.

Робота цього генератора заснована на використанні залишкового магнітного збудження, яке створюється при випуску генератора (для його створення обмотку збудження короткочасно відключають від якоря і підключають до незалежного джерела постійного струму).

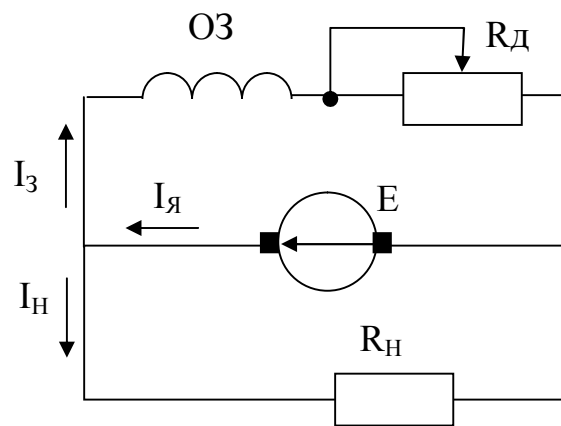


Рис.5. Електрична схема генератора паралельного збудження

Крива намагнічування цього генератора приведена на рис.6, а характеристика холостого ходу на рис.7.

Розглянемо процес самозбудження генератора. При обертанні якоря його провідники перетинають залишковий потік і в обмотці якоря індукується невелика початкова ЕРС

$$E_{\text{поч}} = K_E n \Phi_{\text{зал}}$$

Під дією цієї ЕРС починає протікати струм збудження в обмотці збудження генератора ОЗ, що створює свій магнітний потік. Якщо напрямок магнітного потоку, створеного обмоткою збудження, збігається за напрямком з залишковим магнітним потоком, то загальний магнітний потік збудження зростає. Це викликає збільшення ЕРС генератора, збільшення струму збудження, створюваний їм потік також зростає і т.д. – настає лавиноподібний процес самозбудження генератора.

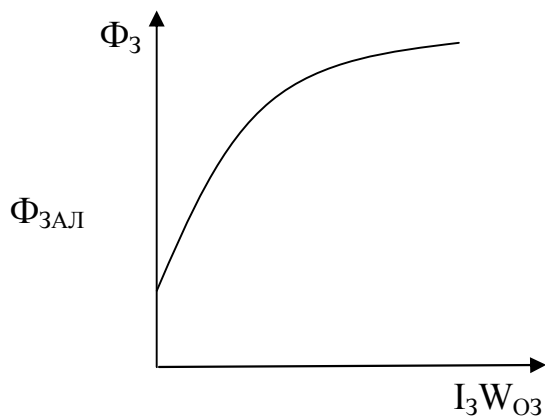


Рис.6. Крива намагнічування

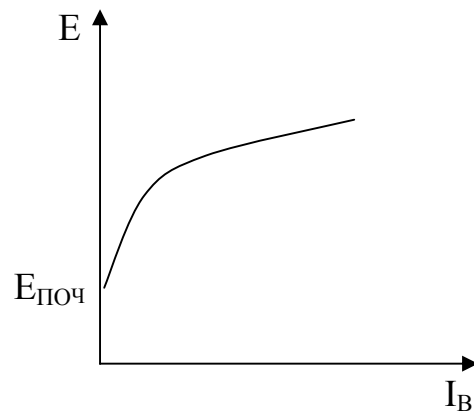


Рис.7. Характеристика холостого ходу

Умови, необхідні для самозбудження:

- наявність Φ_{3AL} ;
- напрямок потоку, створений обмоткою збудження, повинен збігатися за напрямком з Φ_{3AL} .

При роботі генератора на навантаження (рис.1) напруга U на затискачах генератора визначається рівнянням

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}},$$

де $R_{\text{я}}$ - опір обмотки якоря.

По мірі збільшення струму якоря $I_{\text{я}}$ зростає падіння напруги в обмотці якоря $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$, що викликає зниження напруги U генератора, яка надходить до споживача (навантаження).

Залежність напруги U на затискачах генератора від струму якоря $I_{\text{я}}$ при незмінній швидкості обертання якоря і незмінній величині додаткового опору в колі збудження генератора, тобто залежність $U = f(I_{\text{я}})$ при $n = \text{const}$ і $R_{\text{д}} = \text{const}$ називається зовнішньою характеристикою генератора.

У генераторі незалежного збудження (рис.1) ЕРС генератора E зберігає незмінне значення, що не залежить від струму якоря $I_{\text{я}}$, оскільки при в цьому генераторі забезпечується $I_{\text{з}} = \text{const}$, тобто $\Phi_{\text{з}} = \text{const}$; тому зовнішня характеристика цього генератора являє собою пряму лінію (рис.8). Чим

менше значення має опір $R_{я}$, тим більш стабільна напруга генератора при збільшенні струму якоря.

У генераторі паралельного збудження (рис.5) має місце співвідношення $I_3 \ll I_H$, тобто $I_я \approx I_H$, оскільки потужність, споживана обмоткою збудження ОЗ складає дуже малу величину в порівнянні з потужністю в колі навантаження.

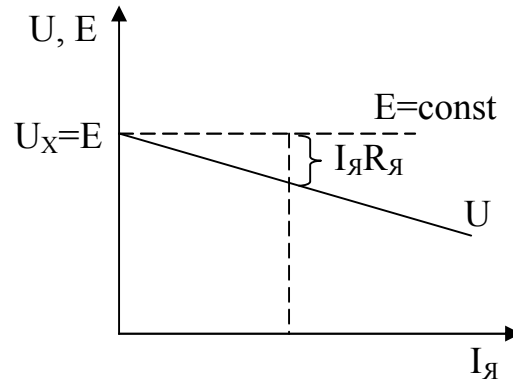


Рис.8. Зовнішня характеристика генератора незалежного збудження

У генераторі паралельного збудження по міру росту струму якоря $I_я$ і відповідного зниження напруги U має місце зменшення струму збудження I_3 . Це призводить до зниження ЕРС генератора E (рис.9). Тому напруга U по мірі росту струму знижується сильніше, ніж у генераторі незалежного збудження.

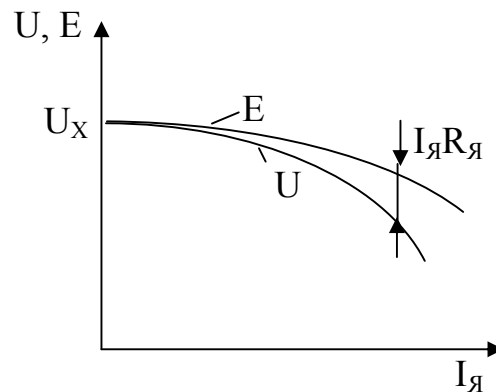


Рис.9. Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

Бажано, щоб напруга U зберігала незмінне значення при будь-якій величині струму якоря. Для цього необхідно збільшувати ЕРС генератора E по мірі росту струму якоря.

Напруга U буде залишатися незмінною (рис.10), якщо збільшення ЕРС генератора E дорівнює падінню напруги в обмотці якоря, тобто повинна дотримуватися умова

$$\Delta E = I_я R_я.$$

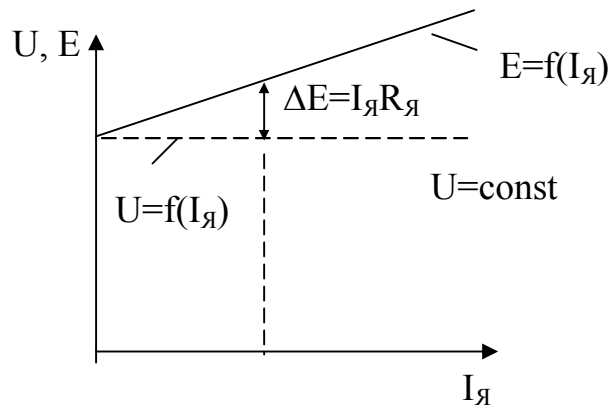


Рис.10. Зовнішня характеристика

Для збільшення ЕРС E необхідно збільшувати струм збудження I_z . Залежність, що показує, як необхідно регулювати струм збудження по мірі росту струму якоря I_a , щоб напруга U залишалася незмінною,

$$I_z = f(I_a)$$

При $n = \text{const}$, $U = \text{const}$ називається регулювальною характеристикою генератора. Регулювальна характеристика (рис.11) однакова для генераторів незалежного і паралельного збудження.

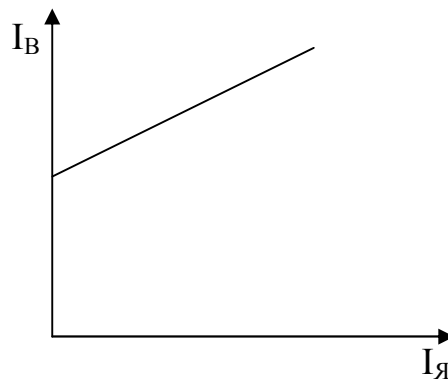


Рис.11. Регулювальна характеристика генератора

3. Основні співвідношення в двигуні постійного струму незалежного збудження і його механічна характеристика

Властивості і характеристики двигунів постійного струму значно залежать від того, як змінюється магнітний потік двигунів при зміні їх, механічного навантаження. У свою чергу, характер зміни магнітного потоку

залежить від числа та способу увімкнення обмоток збудження, тобто від способу збудження двигунів.

В залежності від способу збудження відрізняють:

- двигуни незалежного збудження;
- двигуни паралельного збудження;
- двигуни послідовного збудження;
- двигуни змішаного збудження.

Розглянемо основні співвідношення у двигуні постійного струму незалежного збудження. У двигуні незалежного збудження (рис.12) струм збудження I_3 створює потік збудження Φ_3 згідно кривої намагнічування, що аналогічна приведеній на рис.3.

Напруга U створює в момент пуску в якорі нерухомого двигуна пусковий струм

$$I_0 = \frac{U}{R_{\text{я}}}.$$

Цей струм взаємодіє з потоком і утворює пусковий момент

$$M_0 = K_M \Phi_3 I_0.$$

Під дією пускового моменту якір починає обертатися. При обертанні якоря провідники обмотки якоря починають перетинати магнітні силові лінії потоку й в обмотці якоря індукується ЕРС, яка дорівнює

$$E = K_E n \Phi_3.$$

У двигуні ця ЕРС спрямована назустріч напрузі і струму якоря, тому вона називається проти ЕРС.

При наявності проти ЕРС (рис.12) струм якоря визначається рівнянням

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}},$$

або

$$I_{\text{я}} = \frac{U - K_E n \Phi_3}{R_{\text{я}}}.$$

По мірі росту швидкості обертання двигуна U струм якоря зменшується по лінійному закону. Обертаючий момент M змінюється пропорційно струму якоря (оскільки потік зберігає незмінне значення). Отже, у міру росту швидкості момент M також зменшується по лінійному закону.

При відсутності сил опору розгін двигуна продовжується до швидкості ідеального холостого ходу n_x , при якій струм якоря $I_{я}$ і момент двигуна M дорівнюють нулю.

У цьому режимі

$$E_x = K_E n_x \Phi_3 = U,$$

тобто швидкість ідеального ходу

$$n_x = \frac{U}{K_E \Phi_3}.$$

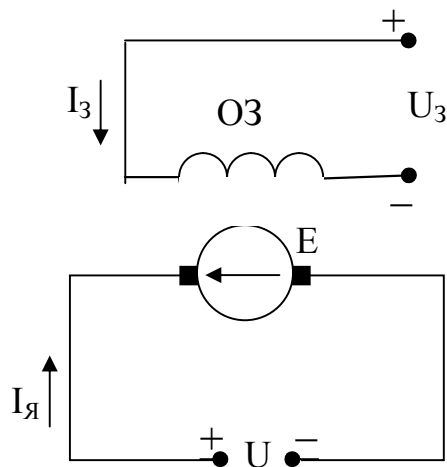


Рис.12. Двигун постійного струму незалежного збудження

Механічна характеристика двигуна – залежність частоти обертання двигуна від моменту, приведена на рис.13.

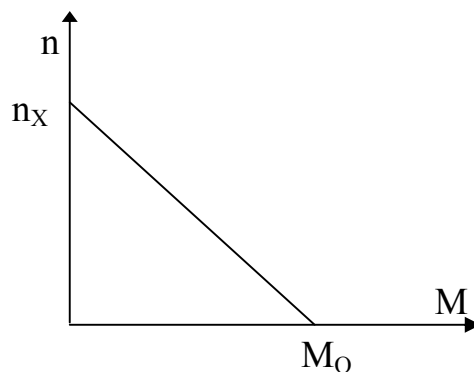


Рис.13. Механічна характеристика двигуна незалежного збудження

Механічна характеристика двигуна незалежного порушення – пряма лінія. Вона проходить через дві характерні точки: точку пускового моменту й точку холостого ходу.

Усі розглянуті рівняння і характеристики застосовуються також для двигуна постійного струму паралельного збудження (рис.14).

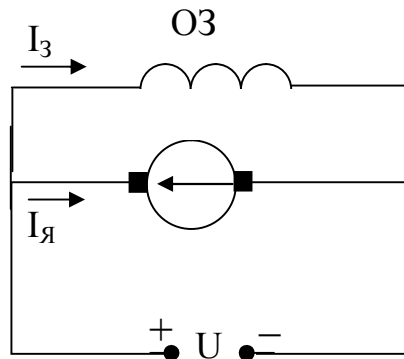


Рис.14. Двигун постійного струму паралельного збудження

У цих двигунах обмотка якоря й обмотка збудження мають однакові номінальні напруги, тому обидві обмотки підключаються до загального джерела постійного струму паралельно.

4. Пуски та регулювання частоти оборотів двигунів постійного струму

Опір обмотки якоря $R_я$ малий. Тому в момент пуску можуть виникати неприпустимо великі пускові струми. Для зменшення пускових струмів у коло якоря на період пуску вводять додатковий опір $R_д$ – пусковий реостат (рис.15).

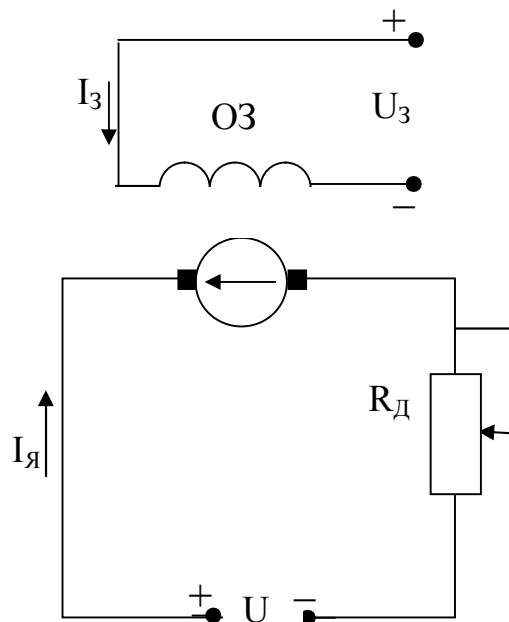


Рис.15. Схема включення додаткового включення резистора

По мірі розгону двигуна опір поступово зменшують. При сукупному розв'язанні рівнянь (3.4) і (3.15) отримаємо рівняння механічної характеристики двигуна, тобто залежність $n=f(M)$

$$n = \frac{U}{K_e \Phi_e^2} - M \frac{R_a + R_d}{K_e K_m \Phi_z^2}.$$

З цього рівняння видно, що частоту обертання можна регулювати трьома способами:

- включенням реостата (реостатне регулювання);
- ослабленням магнітного потоку;
- зміною напруги U на якорі двигуна.

При реостатному регулюванні пусковий момент M_0 залежить від опору R_d . Чим більше R_d , тим менше величина пускового струму I_0 і тим менше пусковий момент M_0 . Швидкість холостого ходу n_x від опору не залежить. Тому при зміні опору R_d одержуємо сімейство механічних характеристик, приведених на рис.16.

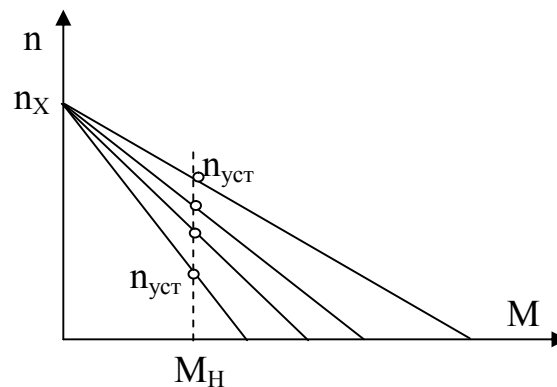


Рис.16. Реостатне регулювання частоти

Чим більше R_d , тим нижче проходить механічна характеристика, тим менше стає значення частоти обертання при даному моменті навантаження M_H . Цей спосіб регулювання широко застосовується, тому що він дуже простий. Недоліки цього способу регулювання – значні втрати енергії в опорі R_d у колі якоря; не можна регулювати швидкість при малих моментах навантаження M_H , тому що у цьому випадку всі характеристики сходяться в одній точці: $n=n_x$.

Користуючись другим способом регулювання, для ослаблення магнітного потоку збудження M_0 додатковий опір R_d вводять коло обмотки збудження (рис.17).

При зниженні потоку Φ_z шляхом струму збудження I_z , що його створює, пусковий момент M_0 зменшується, а обороти холостого ходу n_x зростають.

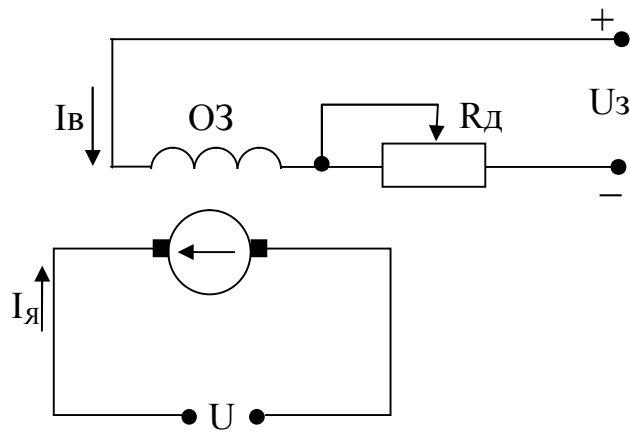


Рис.17. Другий спосіб регулювання частоти

На рис.18 приведені механічні характеристики двигуна при нормальному потоці (пряма 1) і при ослабленому потоці (пряма 2). Цей спосіб регулювання швидкості застосовується, зокрема, для збільшення швидкості зворотних, неробочих рухів механізмів – наприклад при опусканні гака підйомної лебідки, втягуванні рукояті екскаватора і т.д.

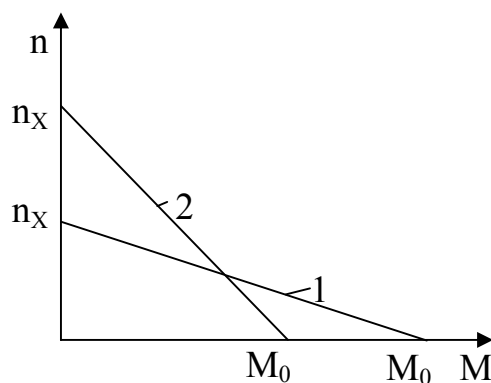


Рис.18. Механічні характеристики при другому способі регулювання

При обриві обмотки збудження може наступити важкий аварійний режим – двигун йде в рознос. У цьому режимі потік $\Phi_z \rightarrow 0$, тобто обороти $n \rightarrow \infty$. Для запобігання аварійного режиму розносу застосовується спеціальний захист, що контролює величину струму збудження і при обриві кола обмотки збудження дає сигнал на автоматичне зняття напруги U з якоря двигуна.

При регулюванні частоти оборотів шляхом зміни напруги U на якорі двигуна якір двигуна одержує живлення від індивідуального джерела струму з регульованою напругою.

У якості такого джерела використовується тиристорний перетворювач ТП (рис.19), або генератор постійного струму незалежного порушення.

У схемі рис.19 постійна напруга U на виході ТП змінюється пропорційно напрузі керування U_K , що формується системою керування.

Пусковий струм $I_0 = \frac{U}{K_E \Phi_B}$ і пусковий момент $M_0 = K_M \Phi_B I_0$

змінюються пропорційно напрузі U . Обороти холостого ходу $n_x = \frac{U}{K_E \Phi_B}$ також пропорційні напрузі U . Тому при зміні напруги U одержуємо сімейство паралельних механічних характеристик (рис.20).

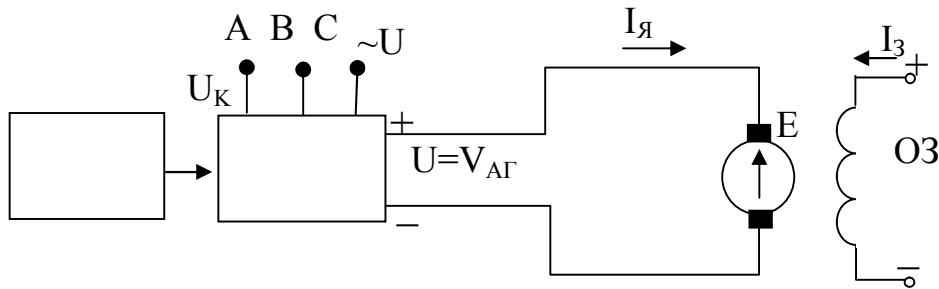


Рис.19. Третій спосіб регулювання частоти оборотів

Цей спосіб регулювання широко застосовується для механізмів, що вимагають плавної зміни швидкості в широкому діапазоні. Переваги даного способу регулювання в порівнянні з реостатним способом: виключаються додаткові втрати енергії у колі якоря; можна регулювати частоту і при малих моментах навантаження (включаючи режим холостого ходу).

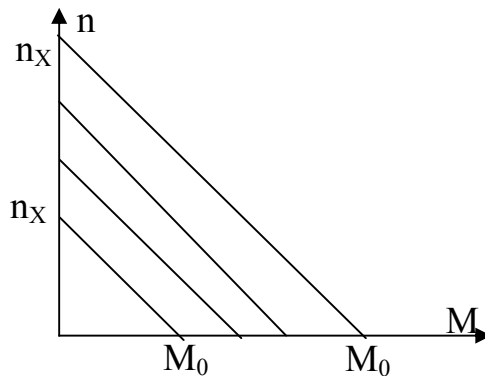


Рис.20. Механічні характеристики при третьому способі регулювання частоти оборотів двигуна

5. Двигуни постійного струму послідовного збудження

Схема двигуна приведена на рис.21. У цьому двигуні обмотка збудження включена послідовно з обмоткою якоря, тому струм збудження $I_з$

дорівнює струму якоря $I_{\text{я}}$, що і визначає властивості і характеристики даного двигуна.

Магнітний потік збудження Φ_3 у двигуні послідовного порушення залежить від струму якоря $I_{\text{я}}$ (тому що $I_3 = I_{\text{я}}$). У момент включення виникає пусковий струм

$$I_0 = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{ОЗ}}},$$

де $R_{\text{я}}$ і $R_{\text{ОЗ}}$ - опір обмотки якоря й обмотки збудження.

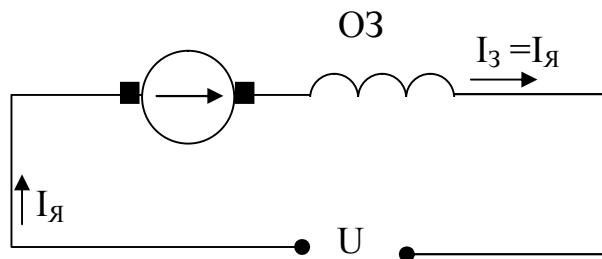


Рис. 21. Схема двигуна постійного струму послідовного збудження

Оскільки ці опори малі, виникає великий пусковий струм I_0 , що створює максимально можливий потік збудження, що відповідає точці «А» кривої намагнічування (рис.22). Струм якоря I_0 взаємодіє з потоком збудження $\Phi_{\text{МАХ}}$ і створює пусковий момент

$$M_0 = K_M \Phi_{\text{МАХ}} I_0.$$

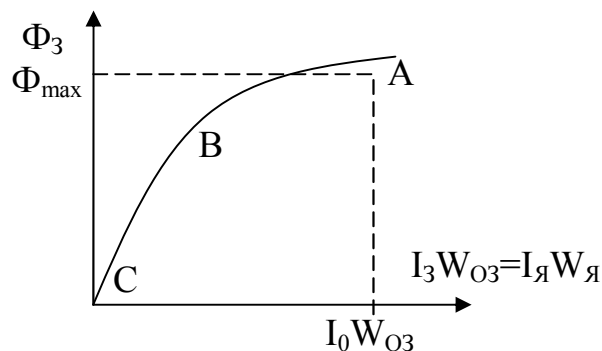


Рис.22. Крива намагнічування

Цінна властивість двигуна послідовного збудження – значний пусковий момент (тому що $\Phi_3 = \Phi_{\text{max}}$).

Під дією моменту M_0 якір починає обертатися. При цьому в якорі з'являється проти ЕРС, і струм визначається залежністю

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}} + R_{\text{оз}}} = \frac{U - K_{\text{Е}} \Phi_{\text{з}} n}{R_{\text{я}} + R_{\text{оз}}}.$$

По мірі розгону проти ЕРС зростає, струм якоря $I_{\text{я}}$ зменшується. Однак потік $\Phi_{\text{з}}$ на першому етапі процесу розгону практично не змінюється, тому що двигун працює на ділянці АВ кривої намагнічування (рис.22), що відповідає насиченню магнітного кола двигуна. Оскільки на ділянці АВ потік $\Phi_{\text{В}} \approx \Phi_{\text{МАХ}} = \text{const}$, то механічна характеристика двигуна на цьому етапі аналогічна механічній характеристиці двигуна незалежного збудження, тобто є прямою лінією (ділянка АВ на рис.23). На другому етапі процесу розгону (ділянка ВС кривої намагнічування на рис.22) по мірі зниження струму $I_{\text{з}} = I_{\text{я}}$ потік збудження $\Phi_{\text{з}}$ також зменшується, що викликає різке збільшення частоти n – ділянка ВС механічної характеристики двигуна на рис.23.

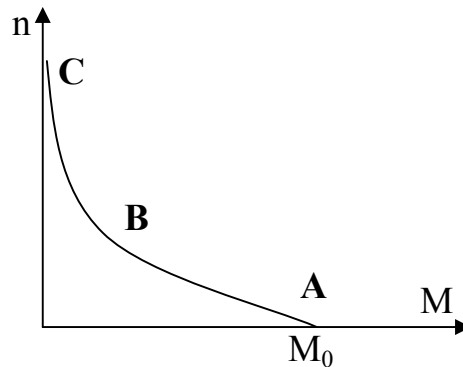


Рис.23. Механічна характеристика двигуна незалежного збудження

Двигун послідовного збудження не можна включати без навантаження, тому що в режимі холостого ходу, коли $I_{\text{я}}=I_{\text{з}} \rightarrow 0$, потік $\Phi_{\text{з}}$ іде в 0, тобто частота обертання $n_{\text{х}} \rightarrow \infty$; двигун йде в рознос.