

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни
«Основи електрики та електроніки»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Аеронавігація)***

за темою №1 – Основи електрики

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023 № 1.

Розробник: викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Інженер з технічного обслуговування, ремонту та діагностики авіаційної техніки ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Калінін О.В.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

План лекцій:

1. Закони Ома і Кірхгофа.
2. Режими роботи і енергетичні співвідношення в ланцюгах постійного струму.
3. Складні електричні ланцюги постійного струму. Методи розрахунку їх параметрів.
4. Послідовне, паралельне і змішане з'єднання елементів ланцюга.
5. Отримання синусоїдальної е.р.с., джерела е.р.с.
6. Діючі значення синусоїдальних е.р.с., напруги і струму.
7. Прості електричні однофазні ланцюги синусоїдального струму.
8. Електричне коло з активним опором, з індуктивністю, з ємністю.
9. Електричне коло з послідовним з'єднанням елементів R, L і C.
10. Потужність ланцюга синусоїдального струму.
11. Підвищення коефіцієнта потужності.
12. Області застосування трифазних пристроїв, структура трифазного ланцюга. Трифазний генератор, отримання трифазної системи е.р.с.
13. Енергетичні характеристики трифазних ланцюгів. Потужність трифазної системи.
14. Призначення, пристрій і принцип дії трансформатора.
14. Режими роботи трансформатора.
15. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії трансформатора.
16. Принцип дії та призначення електричних машин.
17. Перетворення енергії в електричних машинах.
18. Характеристики електричних машин.
19. Режими роботи електричних машин.
20. Захист від зовнішніх впливів електричних машин.

Рекомендована література:

Основна література:

1. В.І. Мілих «Електроніка та електромеханіка» Навчальний посібник, К.: Каравела, 2006 р. – 376 с.
2. Клонтаєвський Ю.П., Сосков Л.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. 2-е вид./За ред. А.Г. Соскова. - К.: Каравела, 2009. -416 с.
3. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. В.І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 452 с.
4. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник. – Львів: видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.
5. Aircraft General Knowledge 2 - Electrics and Electronics - 2014

Допоміжна література:

1. Промислова електроніка: навч. посібник / укл.: Г.О. Андрушак, І.П. Козярьський, Е.В. Майструк. – Чернівці: Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 120 с.

2. Power electronics handbook / Muhammad H. Rashid Ph.D., Fellow IEEE / Professor and Director. University of West Florida Joint Program and Computer Engineering / Printed in Canada, 2010. – 892 pages.

3. Aircraft Electrical and Electronic Systems Principles, operation and maintenance/Mike Tooley and David Wyatt/Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, First edition 2009

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

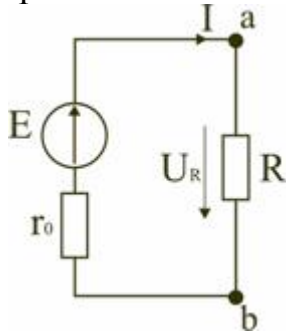
1. https://library.kre.dp.ua/Books/2-4%20kurs/Електронні%20прилади%20та%20мікроелектроніка/Колонтаєвський_Промислова%20електроніка%202004.pdf
2. http://eprints.kname.edu.ua/11615/1/Electron_SE.pdf
3. <https://www.coursehero.com/file/50550879/060-Navigation-2-Radio-Navigation-2014pdf/>
4. <https://www.pooleys.com/shop/cae-oxford-aviation/cae-oxford-aviation-atpl-manual-3-electrics-and-electronics/>
5. https://www.academia.edu/8446456/Aircraft_Electrical_and_Electronic_Systems_Principles_operation_and_maintenance

Текст лекції

1. Закони Ома і Кірхгофа.

Закон Ома для ділянки кола

Співвідношення між струмом I , напругою U і опором R ділянки аб електричного кола виражається законом Ома



$$I = \frac{U_R}{R} \quad \text{або} \quad U_R = RI$$

У цьому випадку $U_R = RI$ – називають напругою або падінням напруги на резисторі R ,

$$I = \frac{U_R}{R}$$

а – струмом в резисторі R .

При розрахунку електричних ланцюгів іноді зручніше користуватися не опором R , а величиною зворотної опору, тобто електричної провідністю:

$$g = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$$

У цьому випадку закон Ома для ділянки кола запишеться у вигляді:

$$I = Ug.$$

Закон Ома для всього ланцюга

Цей закон визначає залежність між ЕРС E джерела живлення з внутрішнім опором r_0 , струмом I електричного кола і загальним еквівалентним опором $R_e = r_0 + R$ всього ланцюга:

$$I = \frac{E}{R_{\Sigma}} = \frac{E}{r_0 + R}$$

Складний електричний ланцюг містить, як правило, кілька гілок, в які можуть бути включені свої джерела живлення і режим її роботи не може бути описаний тільки законом Ома. Але це можна виконати на підставі першого і другого законів Кірхгофа, що є наслідком закону збереження енергії.

Перший закон Кірхгофа

У будь-якому вузлі електричного кола алгебраїчна сума струмів дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0$$

де m – число гілок підключених до вузла.

При записі рівнянь за першим законом Кірхгофа струми, спрямовані до вузла, беруть зі знаком «плюс», а струми, спрямовані від вузла – зі знаком «мінус». Наприклад, для вузла а (див. рис. 03) $I - I_1 - I_2 = 0$.

Другий закон Кірхгофа

У будь-якому замкненому контурі електричного кола алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі падіння напруг на всіх його ділянках

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k = \sum_{k=1}^m U_k$$

де n – число джерел ЕРС в контурі;

m – число елементів з опором R_k в контурі;

$U_k = R_k I_k$ – напруга або падіння напруги на k -му елементі контуру.

Для схеми (03) запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$E = U_R + U_1.$$

Якщо в електричному ланцюзі включені джерела напруг, то другий закон Кірхгофа формулюється в наступному вигляді: алгебраїчна сума напруг на всіх елементах контуру, включаючи джерела ЕРС дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0$$

При записі рівнянь за другим законом Кірхгофа необхідно:

- 1) задати умовні позитивні напрямки ЕРС, струмів і напруг;
- 2) вибрати напрямок обходу контура, для якого записується рівняння;
- 3) записати рівняння, користуючись однієї з формулювань другого закону Кірхгофа, причому доданки, що входять у рівняння, беруть зі знаком «плюс», якщо їх умовні позитивні напрямки збігаються з обходом контуру, і зі знаком «мінус», якщо вони протилежні.

Запишемо рівняння за II законом Кірхгофа для контурів електричної схеми (03):

$$\text{контур I: } E = RI + R_1 I_1 + r_0 I,$$

$$\text{контур II: } R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0,$$

$$\text{контур III: } E = RI + R_2 I_2 + r_0 I.$$

У діючому ланцюзі електрична енергія джерела живлення перетвориться в інші види енергії. На ділянці ланцюга з опором R протягом часу t при струмі I витрачається електрична енергія

$$W = I^2 R t.$$

Швидкість перетворення електричної енергії в інші види представляє електричну потужність

$$P = \frac{W}{t} = I^2 R = UI$$

Із закону збереження енергії випливає, що потужність джерел живлення в будь-який момент часу дорівнює сумі потужностей, що витрачається на всіх ділянках кола.

$$\sum EI = \sum I^2 R$$

Це співвідношення називають рівнянням балансу потужностей. При складанні рівняння балансу потужностей слід врахувати, що якщо дійсні напрямки ЕРС і струму джерела збігаються, то джерело ЕРС працює в режимі джерела живлення, і добуток EI підставляють зі знаком плюс. Якщо не співпадають, то джерело ЕРС працює в режимі споживача електричної енергії, і добуток EI підставляють зі знаком мінус. Для ланцюга на рис. 03 рівняння балансу потужностей запишеться у вигляді:

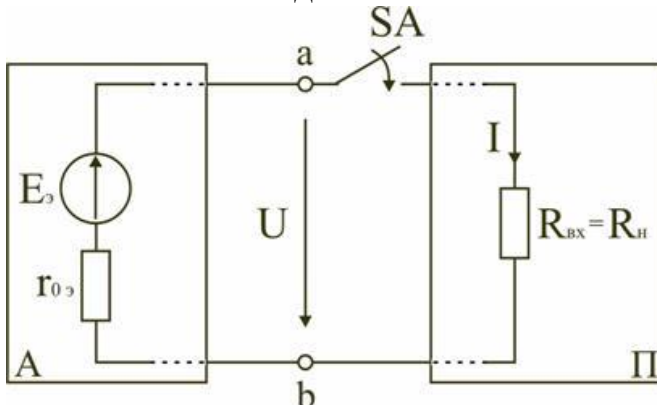
$$EI = I^2 (r_0 + R) + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

При розрахунку електричних ланцюгів використовуються певні одиниці виміру. Електричний струм вимірюється в амперах (А), напруга - у вольтах (В), опір - в омах (Ом), потужність - у ватах (Вт), електрична енергія - ват-годину (Вт-год) і провідність - у Сіменс (см)

Крім основних одиниць використовують більш дрібні й більші одиниці виміру: міліампер ($1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$), кілоампер ($1 \text{ Ka} = 10^3 \text{ A}$), мілівольт ($1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$), кіловольт ($1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$), килоом ($1 \text{ kOm} = 10^3 \text{ Ом}$), мегаом ($1 \text{ MOm} = 10^6 \text{ Ом}$), кіловат ($1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$), кіловат-годину ($1 \text{ кВт-год} = 10^3 \text{ ват-година}$).

2. Режими роботи і енергетичні співвідношення в ланцюгах постійного струму.

Реальний електричний ланцюг може бути представлений у вигляді активного і пасивного двополюсників.



Двухполюсника називають ланцюг, який з'єднується з зовнішньою щодо неї частиною ланцюга через два висновки а й b – полюси.

Активний двухполіусник містить джерела електричної енергії, а пасивний двухполіусник їх не містить. Для розрахунку кіл з двухполіусника реальні активні і пасивні елементи ланцюга представляються схемами заміщення. Схема заміщення пасивного двополіусника Π представляється у вигляді його вхідного опору ($R_{вх}=U/I$). Схема заміщення активного двополіусника A представляється еквівалентним джерелом з ЕРС E_e і внутрішнім опором r_{0e} , навантаженням для якого є вхідний опір пасивного двополіусника $R_{вх} = R_n$.

Режим роботи електричного кола визначається змінами параметрів пасивного двополіусника (величиною опору навантаження R_n). При аналізі електричного кола розглядають наступні режими роботи: холостого ходу, номінальний, короткого замикання і узгоджений.

Робота активного двополіусника під навантаженням R_n визначається його ВАХ, рівняння якої для даного ланцюга запишеться у вигляді

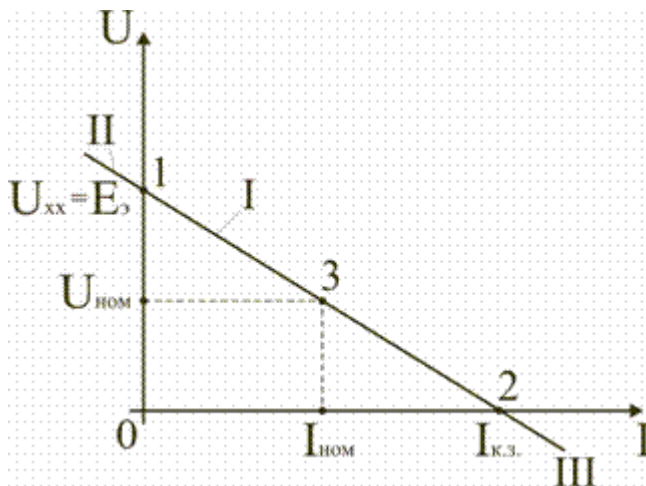
$$U = E_e - I r_{0e}.$$

Ця ВАХ будується по двох точках 1 і 2, відповідним режимам холостого ходу і короткого замикання.

Режим холостого ходу

У цьому режимі за допомогою ключа SA навантаження R_n відключається від джерела живлення. У цьому випадку струм в навантаженні стає рівним нулю, і напруга на затискачах ab стає рівним ЕРС E_e і називається напругою холостого ходу U_{xx}

$$U = U_{xx} = E_e.$$



Режим короткого замикання

У цьому режимі ключ SA в схемі електричного кола замкнений, а опір $R_n = 0$. У цьому випадку напруга U на затискачах ab стає рівним нулю, тому $U = I R_n$, а рівняння вольт-амперної характеристики можна записати у вигляді

$$I = I_{к.з} = \frac{E_e}{r_{0e}}$$

Значення струму короткого замикання $I_{к.з}$ відповідає т.2 на вольт-амперної характеристиці (рис. 1.24).

Аналіз цих двох режимів показує, що при розрахунку електричних ланцюгів параметри активного двополюсника E_e і r_{0e} можуть бути визначені за результатами режимів холостого ходу та короткого замикання:

$$E_e = U_{xx}; \quad r_{0e} = \frac{U_{xx}}{I_{к.з.}}$$

При зміні струму в межах активного двохполюсник віддає енергію в зовнішній ланцюг (ділянка I вольт-амперної характеристики). При струмі $I < 0$ (ділянка II) джерело одержує енергію із зовнішнього ланцюга, тобто працює в режимі споживача електричної енергії. Це станеться, якщо до затискачів аб двохполюсника приєднана зовнішня ланцюг з джерелами живлення. При напрузі $U < 0$ (ділянка III) резистори активного двополюсника споживають енергію джерел із зовнішнього ланцюга і самого активного двополюсника.

Номінальний режим

Номінальний режим електричного кола забезпечує технічні параметри як окремих елементів, так і всього ланцюга, зазначені в технічній документації, у довідковій літературі або на самому елементі. Для різних електротехнічних пристроїв вказують свої номінальні параметри. Однак три основних параметри вказуються практично завжди: номінальна напруга $U_{ном}$, номінальна потужність $P_{ном}$ і номінальний струм $I_{ном}$.

Робота активного двополюсника під навантаженням в номінальному режимі визначається рівнянням, записаному для номінальних параметрів

$$U_{ном} = E_e - I_{ном} r_{0e}.$$

На ВАХ це рівняння визначається точкою 3 з параметрами $U_{ном}$ і $I_{ном}$.

Узгоджений режим

Узгоджений режим електричного кола забезпечує максимальну передачу активної потужності від джерела живлення до навантаження.

Це відбувається за умови $R_n = r_{0e}$.

Значення максимальної потужності, яка може виділена в навантаженні R_n

$$P_{max} = \frac{E_z^2}{4r_{0e}}$$

Корисна потужність, що виділяється в навантаженні, визначається рівнянням:

$$P = I^2 R_n = \frac{E_z^2}{(r_{0e} + R_n)^2} R_n$$

Повна активна потужність, що виділяється активним двополюсником

$$P_{полк} = E_z I = \frac{E_z^2}{r_{0e} + R_n}$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{полн}}} = \frac{R_H}{r_{\text{оз}} + R_H}$$

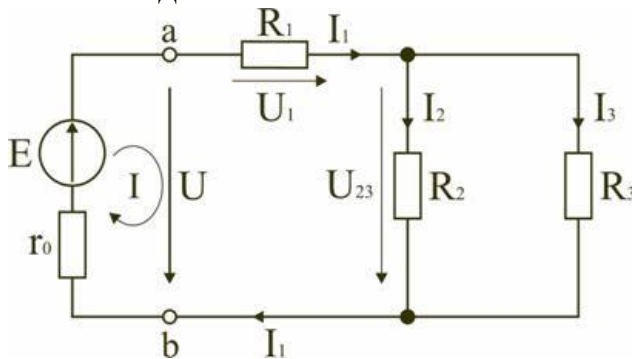
якщо $R_H = r_{0e}$, то $\eta = 0,5$

Для потужних електротехнічних пристроїв таке низьке значення ККД неприпустимо. Але в електронних пристроях і схемах, де величина P вимірюється в міліваттах, з низьким ККД можна не рахуватися, оскільки в цьому режимі забезпечується максимальна передача потужності на навантаження.

3. Складні електричні ланцюги постійного струму. Методи розрахунку їх параметрів.

Розрахунок ланцюга з одним джерелом живлення

Електричний ланцюг складається з одного джерела живлення, що має ЕРС E і внутрішній опір r_0 , і резисторів R_1 , R_2 , R_3 , підключених до джерела за змішаною схемою. Операції розрахунку такої схеми рекомендується проводити в певній послідовності.



1. Позначення струмів і напруг на ділянках кола.

Резистор R_1 включений послідовно з джерелом, тому струм I_1 для них буде спільним, струми в резисторах R_2 і R_3 позначимо відповідно I_2 і I_3 . Аналогічно позначимо напруги на ділянках кола.

2. Розрахунок еквівалентного опору кола.

Резистори R_2 і R_3 увімкнені за паралельною схемою і замінюються еквівалентним опором:

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

У результаті ланцюг перетвориться в ланцюг з послідовно з'єднаними резисторами R_1 , R_{23} і r_0 . Тоді еквівалентний опір всього ланцюга запишеться у вигляді:

$$R_e = r_0 + R_1 + R_{23}$$

3. Розрахунок струму в ланцюзі джерела. Струм I_1 визначимо за законом Ома:

$$I_1 = U / R_e$$

4. Розрахунок напруг на ділянках кола. За законом Ома визначимо величини напруг:

$$U_1 = I_1 R_1; U_{23} = I_1 R_{23}$$

ЕРС джерела живлення визначимо за другим законом Кірхгофа:

$$E = I_1 r_0 + U;$$

5. Розрахунок струмів і потужностей для всіх ділянок ланцюга. Знаючи величину напруги U_{23} , визначимо за законом Ома струми в резисторах R_2 і R_3 :

$$I_2 = \frac{U_{23}}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U_{23}}{R_3}$$

Визначимо величину активної електричної потужності, що віддається джерелом живлення споживачам електричної енергії:

$$P = EI_1.$$

В елементах схеми витрачаються активні потужності:

$$P_1 = I_1^2 R_1, \quad P_2 = I_2^2 R_2, \quad P_3 = I_3^2 R_3$$

На внутрішньому опорі r_0 джерела живлення витрачається частина електричної потужності, що віддається джерелом. Цю потужність називають потужністю втрат ΔP :

$$\Delta P = I_1^2 r_0$$

6. Перевірка правильності розрахунків. Ця перевірка проводиться складанням рівняння балансу потужностей (1.8): потужність, що віддається джерелом живлення, повинна дорівнювати сумі потужностей, що витрачаються в резистивних елементах схеми:

$$EI_1 = I_1^2 (r_0 + R_1) + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3$$

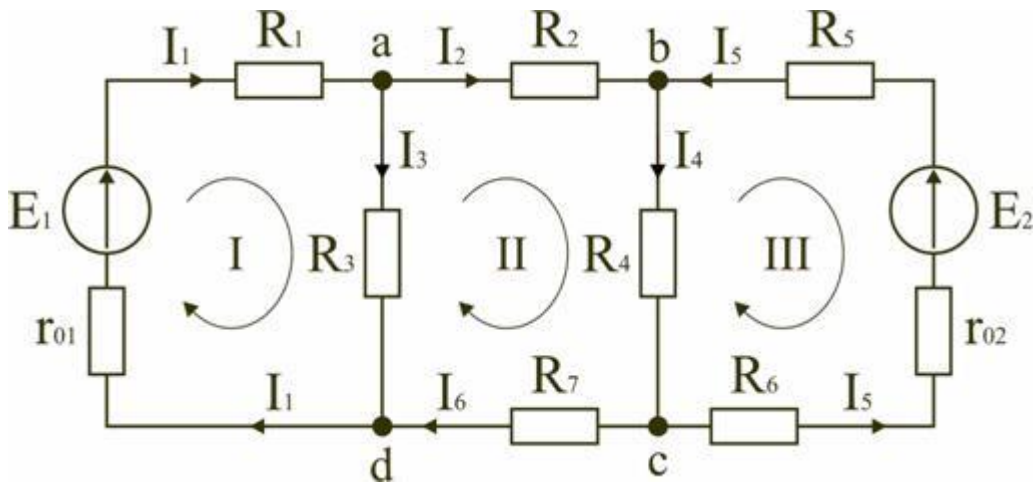
Крім того, правильність обчислення струмів можна перевірити, склавши рівняння по першому закону Кірхгофа для вузла схеми:

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Розрахунок розгалуженого електричного кола з декількома джерелами живлення

Основним методом розрахунку є метод безпосереднього застосування першого і другого законів Кірхгофа.

Схема ланцюга містить 6 гілок ($m = 6$) і 4 вузли: a, b, c, d ($n = 4$). За кожної гілки проходить свій струм, отже число невідомих струмів дорівнює числу гілок, і для визначення струмів необхідно скласти m рівнянь. При цьому за першим законом Кірхгофа складають рівняння для $(n-1)$ вузлів. Відсутні $m-(n-1)$ рівняння отримують за другим законом Кірхгофа, складаючи їх для $m-(n-1)$ взаємно незалежних контурів. Рекомендується виконувати операції розрахунку в певній послідовності.



1. Позначення струмів у всіх гілках. Напрямок струмів вибираємо довільно, але в ланцюгах з джерелами ЕРС рекомендуються, щоб напрямок струмів співпадав з напрямом ЕРС.

2. Складання рівнянь за першим законом Кірхгофа. Вибираємо $4-1 = 3$ вузла (a, b, c) і для них записуємо рівняння:

вузол a: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$; вузол b: $I_2 - I_4 + I_5 = 0$; вузол c: $I_4 - I_5 + I_6 = 0$.

3. Складання рівнянь за другим законом Кірхгофа. Необхідно скласти $6-3 = 3$ рівняння. У схемі на рис. 1.26 вибираємо контури I, II, III і для них записуємо рівняння:

контур I: $E_1 = I_1 (r_{01} + R_1) + I_3 R_3$;

контур II: $0 = I_2 R_2 + I_4 R_4 + I_6 R_7 - I_3 R_3$;

контур III: $-E_2 = -I_5 (r_{02} + R_5 + R_6) - I_4 R_4$.

4. Рішення отриманої системи рівнянь та аналіз результатів. Отримана система з шести рівнянь вирішується відомими математичними методами. Якщо в результаті розрахунків чисельне значення струму отримано зі знаком «мінус», це означає, що реальний напрям струму даної гілки протилежно прийнятому на початку розрахунку. Якщо в гілках з ЕРС струми збігаються за напрямком з ЕРС, то дані елементи працюють у режимі джерел, віддаючи енергію в схему. У тих гілках, де напряму струму і ЕРС не збігаються, джерела ЕРС працює в режимі споживача.

5. Перевірка правильності розрахунків. Для перевірки правильності проведених розрахунків можна на підставі законів Кірхгофа написати рівняння для вузлів і контурів схеми, які не використовувалися при складанні вихідної системи рівнянь:

вузол d: $I_3 + I_6 - I_1 = 0$

зовнішній контур схеми: $E_1 - E_2 = I_1 (r_{01} + R_1) + I_2 R_2 - I_5 (r_{02} + R_5 + R_6) + I_6 R_7$.

Незалежної перевіркою є складання рівняння балансу потужностей з урахуванням режимів роботи елементів схеми з ЕРС:

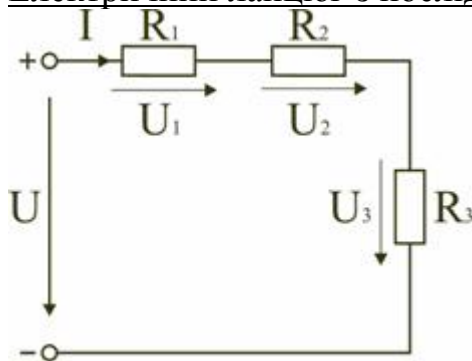
$$E_1 I_1 + E_2 I_5 = I_1^2 (r_{01} + R_1) + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 (r_{02} + R_5 + R_6) + I_6^2 R_7$$

Якщо активна потужність, що поставляється джерелами живлення, рівна по величині активної потужності, витраченої в пасивних елементах електричного кола, то правильність розрахунків підтверджена.

4. Послідовне, паралельне і змішане з'єднання елементів ланцюга.

Опори в електричних ланцюгах можуть бути з'єднані послідовно, паралельно, за змішаною схемою і за схемами «зірка», «трикутник». Розрахунок складної схеми спрощується, якщо опори в цій схемі замінюються одним еквівалентним опором $R_{\text{екв}}$.

Електричний ланцюг з послідовним з'єднанням елементів

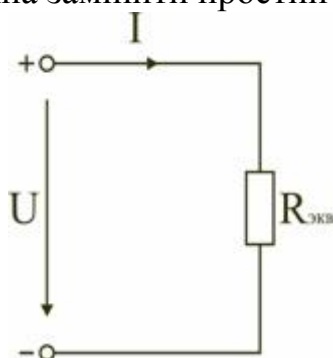


Послідовним називають таке з'єднання елементів ланцюга, при якому у всіх включених в ланцюг елементах виникає одне і те ж струм I .

На підставі другого закону Кірхгофа загальна напруга U всього ланцюга дорівнює сумі напруг на окремих ділянках:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \text{ або } I R_{\text{екв}} = I R_1 + I R_2 + I R_3, \text{ звідки } R_{\text{екв}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

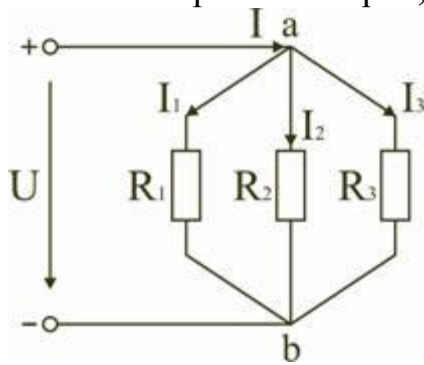
Таким чином, при послідовному з'єднанні елементів кола загальний еквівалентний опір ланцюга дорівнює арифметичній сумі опорів окремих ділянок. Отже, ланцюг з будь-яким числом послідовно включених опорів можна замінити простим ланцюгом з одним еквівалентним опором $R_{\text{екв}}$.



Недолік послідовного включення елементів полягає в тому, що при виході з ладу хоча б одного елемента, припиняється робота всіх інших елементів ланцюга.

Електричний ланцюг з паралельним з'єднанням елементів

Паралельним називають таке з'єднання, при якому всі включені в ланцюг споживачі електричної енергії, перебувають під одною напругою.



Загальний струм I всього ланцюга дорівнює алгебраїчній сумі струмів окремих гілок:

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \quad \text{тобто} \quad \frac{U}{R_{\text{зкв}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}, \quad \text{звідки} \quad \frac{1}{R_{\text{зкв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$R_{\text{екв}} = (R_1 R_2 R_3) / (R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)$$

У тому випадку, коли паралельно включені два опори R_1 і R_2 , вони замінюються одним еквівалентним опором

$$R_{\text{зкв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Еквівалентна провідність ланцюга дорівнює арифметичній сумі провідностей окремих гілок:

$$g_{\text{екв}} = g_1 + g_2 + g_3.$$

При збільшенні числа паралельно включених споживачів провідність ланцюга $g_{\text{екв}}$ зростає, і навпаки, загальний опір $R_{\text{екв}}$ зменшується.

Напруги в електричному ланцюзі з паралельно з'єднаними опорами

$$U = IR_{\text{екв}} = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

За паралельно включеної схемою працюють в номінальному режимі споживачі будь-якої потужності, розраховані на одну напругу. Причому включення або відключення одного або декількох споживачів не відображається на роботі інших. Тому ця схема є основною схемою підключення споживачів до джерела електричної енергії.

5. Отримання синусоїдальної е.р.с., джерела е.р.с.

У сучасній техніці широко використовують різноманітні за формою змінні струми і напруги: синусоїдальні, прямокутні, трикутні та ін.. Значення струму, напруги, ЕРС в будь-який момент часу t називається миттєвим значенням і позначається

$$i = i(t); u = u(t); e = e(t).$$

Струми, напруги і ЕРС, миттєві значення яких повторюються через рівні проміжки часу, називають періодичними, а найменший проміжок часу, через який ці повторення відбуваються, називають періодом T .

У промислових масштабах електрична енергія виробляється, передається і витрачається споживачами у вигляді синусоїдальних струмів, напруг і ЕРС.

При розрахунку і аналізі електричних ланцюгів застосовують кілька способів подання синусоїдальних електричних величин.

Аналітичний спосіб

Для струму $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$

для напруги $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$

для ЕРС $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_e),$

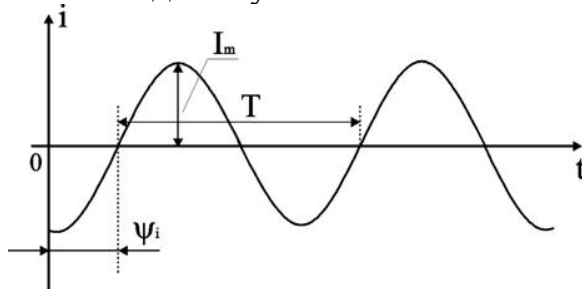
I_m, U_m, E_m – амплітуди струму, напруги, ЕРС; значення в дужках – повна фаза;

ψ_i, ψ_u, ψ_e – початкова фаза струму, напруги, ЕРС; (рад або град)

ω – циклічна частота (рад/с), $\omega = 2\pi f$;

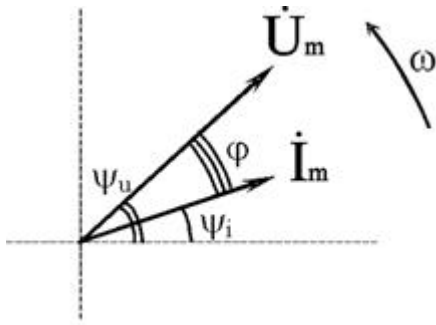
f – частота (Гц), $f = 1 / T$; T – період (с).

Часова діаграма - представляє графічне зображення синусоїдальної величини в заданому масштабі в залежності від часу



$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \psi_i).$$

Графоаналітичний спосіб



Графічно синусоїдальні величини зображуються у вигляді обертового вектора. Передбачається обертання проти годинникової стрілки з частотою обертання ω . Величина вектора в заданому масштабі являє амплітудне значення. Проекція на вертикальну вісь є миттєве значення величини.

Сукупність векторів, що зображують синусоїдальні величини (струм, напруга, ЕРС) однієї і тієї ж частоти називають **векторною діаграмою**.

Векторні величини відзначаються точкою над відповідними змінними.

Використання векторних діаграм дозволяє істотно спростити аналіз ланцюгів змінного струму, зробити його простим і наочним.

В основі графоаналітичного способу аналізу ланцюгів змінного струму лежить побудова векторних діаграм.

6. Діючі значення синусоїдальних е.р.с., напруги і струму.

Для порівняння дій постійного і змінного струмів вводять поняття діюче значення змінного струму. Діюче значення змінного струму чисельно дорівнює такому постійному струму, при якому за час рівне одному періоду в провіднику з опором R виділяється така ж кількість теплової енергії, як і при змінному струмі.

Визначимо кількість енергії, що виділяється за період в провіднику з опором R для кожного з струмів і прирівняємо їх.

1) переменний ток	2) постоянный ток	$\left. \begin{aligned} Q_{\sim} &= \int_0^T i(t)R dt \\ Q_{=} &= I^2 RT \end{aligned} \right\} Q_{\sim} = Q_{=}$

$$\int_0^T i^2(t)R dt = I^2 RT; \Rightarrow I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

Для будь-якої з синусоїдальних величин отримуємо

Домовилися, що всі вимірювальні прилади показують діючі значення. Наприклад, 220 В - діюче значення, тоді $u(t) = 220\sqrt{2} \sin \omega t$.

7. Прості електричні однофазні ланцюги синусоїдального струму.

Індуктивність

Навколо всякого провідника зі струмом утворюється магнітне поле, яке характеризується вектором магнітної індукції \vec{B} і магнітним потоком Φ :

$$\Phi = \int_S \vec{B} \times d\vec{S}$$

Якщо поле утворюють кілька (w) провідників з однаковим струмом, то використовують поняття потокозчеплення ψ

$$\psi = w \Phi.$$

Відношення потокозчеплення до струму, який його створює називають індуктивністю котушки

$$L = \psi / i \text{ (Гн – Генрі).} \quad \Phi = LI.$$

При зміні в часі потокозчеплення згідно закону Фарадея виникає ЕРС самоіндукції

$$e_L = - d\psi / dt = - L \cdot di / dt.$$

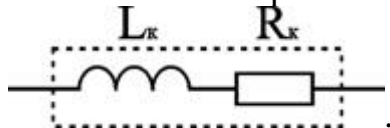
Ця ЕРС завжди перешкоджає зміні струму (закон Ленца). Тому, щоб через провідники весь час тек струм, необхідно до провідників прикладати компенсує напругу

$$u_L = -e_L = L \cdot di / dt$$

Це співвідношення є аналогом закону Ома для індуктивності. Конструктивно індуктивність виконується у вигляді котушки з дротом.

Умовне позначення індуктивності 

Котушка з проводом крім властивості створювати магнітне поле володіє активним опором R . Умовне позначення реальної індуктивності



Ємність

Всі провідники з електричним зарядом створюють електричне поле. Характеристикою цього поля є різниця потенціалів (напруга). Електричну ємність визначають відношенням заряду провідника до напруги

$$C = Q / U_C. \text{ (Фарада – } 1\text{Ф} = 1\text{кл} / 1\text{В} = 1\text{Кулон} / 1\text{Вольт})$$

З урахуванням співвідношення

$$i = dQ / dt = C \cdot du_C / dt.$$

Для зручності її інтегрують і отримують $u_C = 1 / C \cdot \int i dt.$

Це співвідношення є аналогом закону Ома для ємності.

Конструктивно ємність виконується у вигляді двох провідників розділених шаром діелектрика. Форма провідників може бути плоскою, трубчастою, кулястою та ін

Одиницею виміру ємності є Фарада:

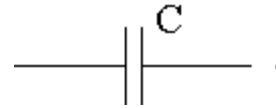
Виявилося, що Фарада є великою одиницею, наприклад, ємність земної кулі дорівнює $\approx 0,7$ Ф. Тому найчастіше використовують дробові значення

1 пФ = 10^{-12} Ф, (пФ - пікофарад);

1 нФ = 10^{-9} Ф, (нФ - нанофарадах);

1 мкФ = 10^{-6} Ф, (мкФ - мікрофарад).

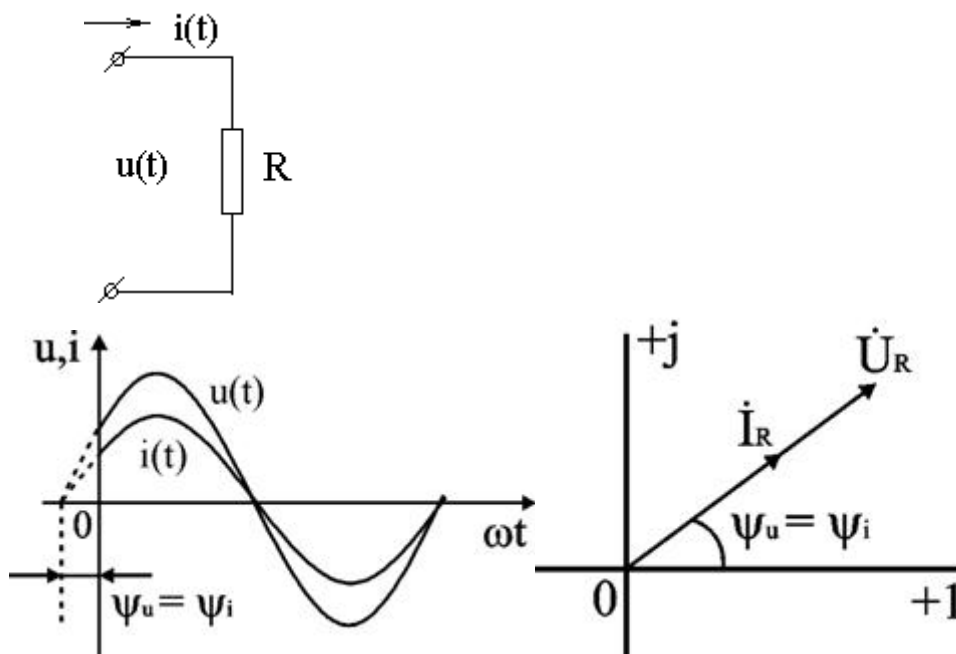
Умовним позначенням ємності є символ



8. Електричне коло з активним опором, з індуктивністю, з ємністю.

Найпростіші ланцюги - ланцюги, що містять один елемент.

Ділянка ланцюга, що містить активний опір.



Змінний струму в резисторі:

$$i(t) = I_{mR} \sin(\omega t + \psi_i).$$

Законом Ома для миттєвих значень струму і напруги $u(t) = R i(t)$

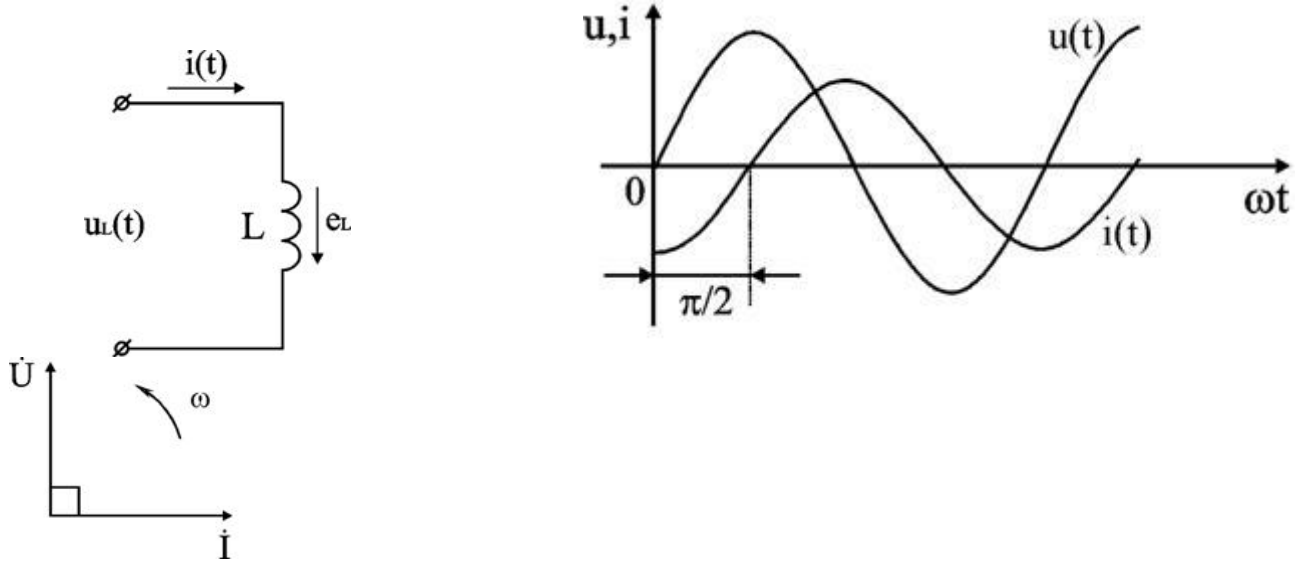
і тоді

$$u(t) = R I_{mR} \sin(\omega t + \psi_i) = U_{mR} \sin(\omega t + \psi_u)$$

$U_{mR} = R I_{mR}$ – амплітуди, $\psi_u = \psi_i$ – фази, $U_R = R I_R$ – діючі значення

Тобто фази напруги і струму в резисторі збігаються. Графічно це представлено на часовій діаграмі і у векторному виді.

Ділянка ланцюга, що містить ідеальну індуктивність



Струм в індуктивності

$$i(t) = I_{mL} \sin(\omega t + \psi_i).$$

Використовуємо рівняння зв'язку між струмом і напругою в індуктивності $u_L = L \cdot di / dt$

і отримаємо $u_L(t) = \omega L \cdot I_{mL} \cos(\omega t + \psi_i) = \omega L \cdot I_{mL} \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ) = U_{mL} \sin(\omega t + \psi_u)$.

Тобто $U_{mL} = \omega L \cdot I_{mL}$ – амплітуди, $\psi_u = \psi_i + 90^\circ$ – фази, $U_L = \omega L \cdot I_L$ – діючі значення.

Фаза струму в індуктивності відстає від фази напруги на 90° . Величину $X_L = \omega L$ в рівнянні називають індуктивним опором. Одиницею його вимірювання є Ом. Графічно електричні процеси в індуктивності представлені на рис.

Ділянка ланцюга, що містить ємність

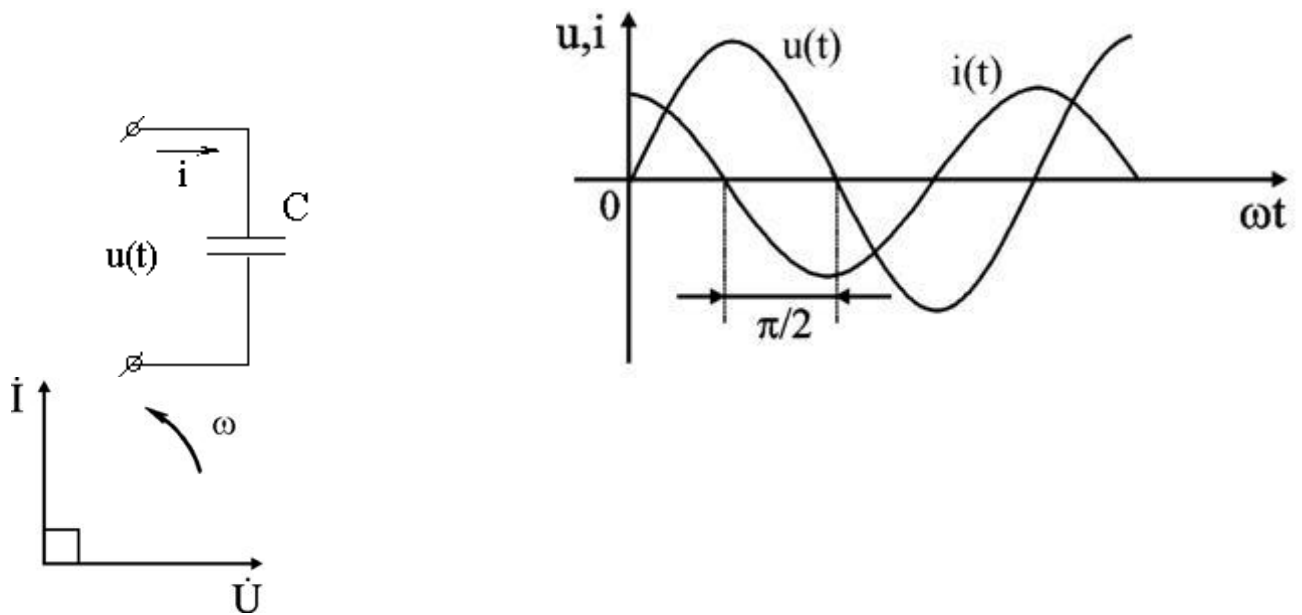


Рис. 2.12

Струму в ємності $i(t) = I_{mC} \sin(\omega t + \psi_i)$.

Рівнянням зв'язку між струмом і напругою в ємності $u_C = 1 / C \cdot \int i \, dt$,

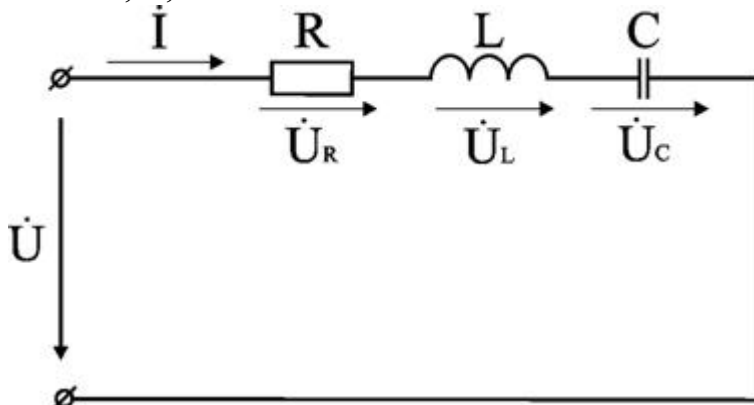
$$u_C = 1 / (\omega C) \cdot I_{mC} (-\cos(\omega t + \psi_i)) = 1 / (\omega C) \cdot I_{mC} \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ) = U_{mC} \sin(\omega t + \psi_u).$$

$U_{mC} = 1 / (\omega C) \cdot I_{mC}$ – амплітуди, $\psi_u = \psi_i - 90^\circ$ – фази, $U_C = 1 / (\omega C) \cdot I_C$ – діючі значення.

Фаза напруги в ємності відстає від фази струму на 90° . Величину $X_C = 1 / (\omega C)$ називають ємнісним опором ланцюга і вимірюють його в Омах. Графічно електричні процеси в ємності представлені на рис.

9. Електричне коло з послідовним з'єднанням елементів R, L і C.

Проведемо аналіз роботи електричного кола з послідовним з'єднанням елементів R, L, C.



Припустимо, що в цьому завданні задані величини R , L , C , частота f , напруга U . Потрібно визначити струм в колі і напругу на елементах ланцюга. З властивості послідовного з'єднання випливає, що струм у всіх елементах ланцюга однаковий. Завдання розбивається на ряд етапів.

1. Визначення опорів.

Реактивні опору елементів L і C знаходимо за формулами $X_L = \omega L$, $X_C = 1 / \omega C$, $\omega = 2\pi f$.

Повний опір ланцюга $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

кут зсуву фаз дорівнює $\varphi = \arctg((X_L - X_C) / R)$,

2. Знаходження струму. Струм в ланцюзі знаходиться за законом Ома

$I = U / Z$, $\psi_i = \psi_u + \varphi$. Фази струму і напруги відрізняються на кут φ .

3. Розрахунок напруг на елементах. Напруги на елементах визначаються за формулами

$$U_R = I R, \psi_{uR} = \psi_i;$$

$$U_L = I X_L, \psi_{uL} = \psi_i + 90^\circ;$$

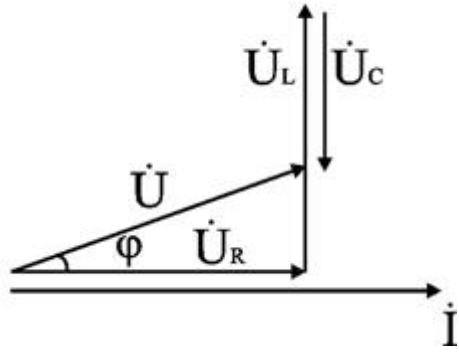
$$U_C = I X_C, \psi_{uC} = \psi_i - 90^\circ.$$

Для напружень виконується другий закон Кірхгофа у векторній формі $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$.

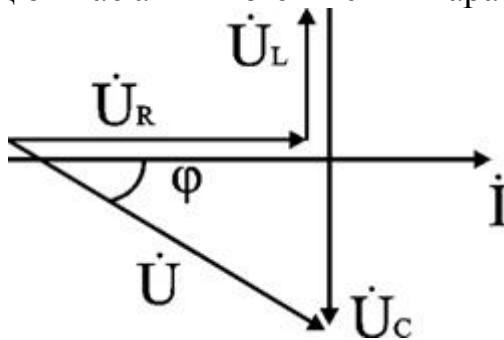
4. Аналіз розрахункових даних.

В залежності від величин L і C можливі наступні варіанти: $X_L > X_C$; $X_L < X_C$; $X_L = X_C$.

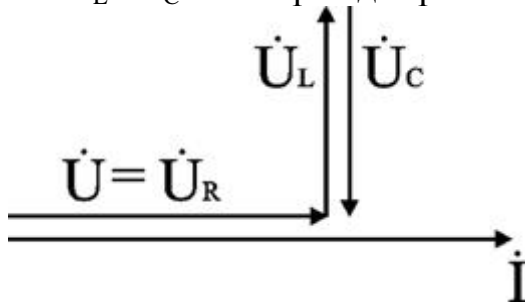
Для варіанта $X_L > X_C$ кут $\varphi > 0$, $U_L > U_C$. Струм відстає від напруги на кут φ . Ланцюг має активно-індуктивний характер. Векторна діаграма напруг має вигляд:



Для варіанта $X_L < X_C$ кут $\varphi < 0$, $U_L < U_C$. Струм випереджає напругу на кут φ . Ланцюг має активно-ємнісний характер. Векторна діаграма напруг має вигляд:



Для варіанта $X_L = X_C$ кут $\varphi = 0$, $U_L = U_C$. Струм збігається з напругою. Ланцюг має активний характер. Повний опір $z = R$ найменше з усіх можливих значень X_L і X_C . Векторна діаграма напруг має вигляд:



Цей режим називається резонанс напруг ($U_L = U_C$). Напруги на елементах U_L і U_C можуть значно перевищувати вхідну напругу.

Приклад.

$U = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $R = 22 \text{ Ом}$, $L = 350 \text{ мГн}$, $C = 28,9 \text{ мкФ}$.

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,35 = 110 \text{ Ом};$$

$$X_C = 1 / \omega C = 1 / (2\pi f C) = 110 \text{ Ом};$$

$$Z = R = 22 \text{ Ом}, \varphi = 0, I = U / R = 220/22 = 10 \text{ А}, \psi_u = \psi_i;$$

$$U_L = U_C = I X_L = 10 \cdot 110 = 1100 \text{ В}.$$

У наведеному прикладі U_L і U_C перевищують вхідну напругу в 5 разів.

10. Потужність ланцюга синусоїдального струму.

Повним опором ланцюга називають величину $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ [Ом]

R – активний опір. Активним називають опір резистора, який не залежить від частоти.

$X = X_L - X_C$ – реактивний опір.

$X_L = \omega L$ – індуктивний опір, лінійно залежить від частоти.

$X_C = 1 / \omega C$ – ємнісний опір, залежить від частоти по обернено-пропорційному закону.

опори Z , R і X утворюють трикутник: Z - гіпотенуза, R і X - катети. Для зручності в цьому трикутнику розглядають кут φ , який визначають рівнянням

$$\varphi = \arctg((X_L - X_C) / R),$$

і називають кутом зсуву фаз. З урахуванням нього можна дати додаткові зв'язки

$$R = Z \cos \varphi, X = Z \sin \varphi.$$

Розглянемо потужність у кожному з елементів R , L і C окремо.

Елемент R (резистор)

$$P = U I.$$

Рівняння збігається з потужністю на постійному струмі. Величина P , дорівнює добутку діючих значень струму і напруги називають активною потужністю. Одиницею її вимірювання є Ват (Вт).

Елемент L (індуктивність)

Відомо, що в індуктивності співвідношення фаз $\psi_u = \psi_i + 90^\circ$.

Для кількісної оцінки потужності в індуктивності використовують величину Q_L

$$Q_L = (U_m I_m) / 2 = I^2 X_L$$

і називають її реактивною (індуктивною) потужністю. Одиниця виміру ВАр (вольт-ампер реактивний).

Елемент C (ємність)

Відомо, що в ємності співвідношення фаз $\psi_u = \psi_i - 90^\circ$.

$$Q_C = (U_m I_m) / 2 = I^2 X_C [\text{ВАр}] - \text{реактивна (ємнісна) потужність}.$$

Якщо в ланцюзі присутні елементи R , L і C , то активна і реактивна потужності визначаються рівняннями

$$P = U I \cos \varphi, Q = Q_L - Q_C, Q = U I \sin \varphi, \text{ де } \varphi - \text{кут зсуву фаз}.$$

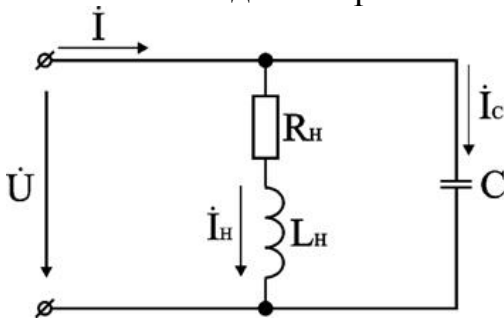
Вводять поняття повної потужності ланцюга $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ або $S = U I$.
Одиницею виміру повної потужності є ВА - вольт-ампер.

11. Підвищення коефіцієнта потужності.

Активна потужність споживача визначена формулою $P = U I \cos \varphi$.

Величину $\cos \varphi$ називають коефіцієнтом потужності. Струм в лінії споживача із заданою потужністю P дорівнює $I = P / (U \cos \varphi)$.

і буде тим більше, чим менше $\cos \varphi$. При цьому зростають втрати в лінії живлення. Для їх зниження бажано збільшувати $\cos \varphi$. Більшість споживачів має активно-індуктивне навантаження. Збільшення $\cos \varphi$ можливо шляхом компенсації індуктивної складової струму шляхом підключення паралельно навантаженню конденсатора:



Розрахунок ємності додаткового конденсатора для забезпечення заданого $\cos \varphi$ проводиться таким чином:

Відомі параметри навантаження R_H , U і I_H . Можна визначити $\cos \varphi_H$

$$\cos \varphi_H = P / (U I_H).$$

Ємність конденсатора

$$C = (\operatorname{tg} \varphi_H - \operatorname{tg} \varphi) \cdot P_H / \omega U^2 \quad (\varphi - \text{той що треба отримати})$$

Для більших значень R_H величина ємності C може виявитися занадто великою, що технічно важко реалізувати. У цьому випадку використовують синхронні компенсуючі машини.

12. Області застосування трифазних пристроїв, структура трифазного ланцюга. Трифазний генератор, отримання трифазної системи е.р.с.

Трифазний ланцюг є окремим випадком багатофазних систем електричних ланцюгів, що представляють собою сукупність електричних ланцюгів, в яких діють синусоїдальні ЕРС однакової частоти, що відрізняються по фазі одна від одної і створювані загальним джерелом енергії.

Кожну з частин багатофазної системи, що характеризується однаковим струмом, прийнято називати фазою. Таким чином, поняття "фаза" має в електротехніці два значення: перше - аргумент синусоїдально змінної

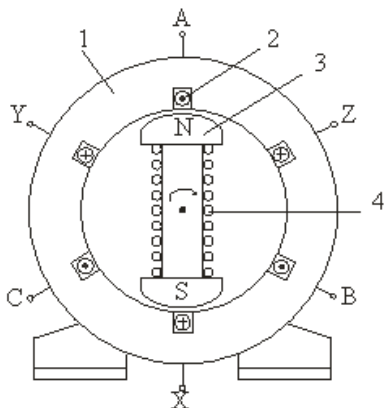
величини, друге - частина багатофазної системи електричних ланцюгів. Ланцюги в залежності від кількості фаз називають двофазним, трифазними, шестифазними і т.п.

Трифазні ланцюги - найбільш поширені в сучасній електроенергетиці. Це пояснюється рядом їх переваг порівняно як з однофазними, так і з іншими багатофазними ланцюгами:

- економічність виробництва і передачі енергії в порівнянні з однофазними ланцюгами;
- можливість порівняно простого отримання кругового обертового магнітного поля, необхідного для трифазного асинхронного двигуна;
- можливість отримання в одній установці двох експлуатаційних напруг - фазного і лінійного.

Трифазний ланцюг складається з трьох основних елементів: трифазного генератора, в якому механічна енергія перетворюється в електричну з трифазною системою ЕРС; лінії передачі з усім необхідним обладнанням; приймачів (споживачів), які можуть бути як трифазними (наприклад, трифазні асинхронні двигуни), так і однофазними (наприклад, лампи розжарювання).

Трифазний генератор являє собою синхронну машину двох типів: турбогенератор або гідрогенератор.

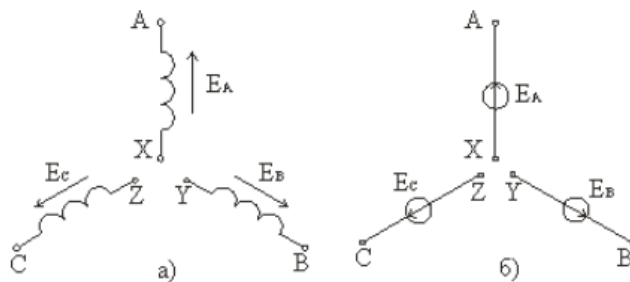


Схематична модель трифазного генератора.

На статорі 1 генератора розміщується обмотка 2, що складається з трьох частин або, як їх прийнято називати, фаз. Обмотки фаз розташовуються на статорі таким чином, щоб їх магнітні вісі були зміщені в просторі відносно один одного на кут $2\pi / 3$, тобто на 120° . На рис. 3.1 кожна фаза обмотки статора умовно показана складається з одного витка. Початки фаз позначені літерами A, B і C, а кінці - X, Y, Z. Ротор 3 являє собою електромагніт, порушуваний постійним струмом обмотки збудження 4, розташованої на роторі.

При обертанні ротора турбіною з рівномірною швидкістю в обмотках фаз статора індукуються періодично змінні синусоїдальні ЕРС однакової частоти і амплітуди, але відрізняються вони одна від одної по фазі на 120° внаслідок їх просторового зміщення.

На схемі обмотки (або фази) джерела живлення зображують як показано на рис.



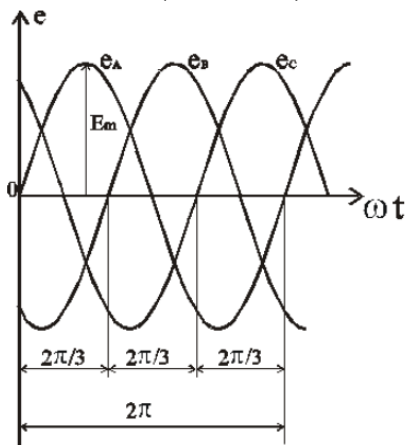
За умовне позитивний напрямок ЕРС в кожній фазі приймають напрямок від кінця до початку. Зазвичай індуктована в обмотках статора ЕРС має однакові амплітуди і зміщення по фазі відносно один одного на один і той же кут 120° . Така система ЕРС називається симетричною.

Якщо ЕРС однієї фази (наприклад, фази А) прийняти за вихідну і вважати її початкову фазу рівною нулю, то вирази миттєвих значень ЕРС можна записати у вигляді

$$e_A = E_m \sin \omega t,$$

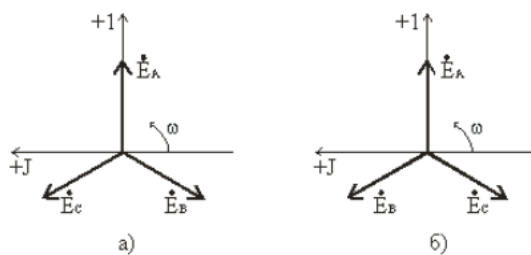
$$e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ),$$

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) = E_m \sin (\omega t + 120^\circ).$$



Графіки миттєвих значень трифазної симетричної системи ЕРС

З графіка миттєвих значень слід $e_A + e_B + e_C = 0$



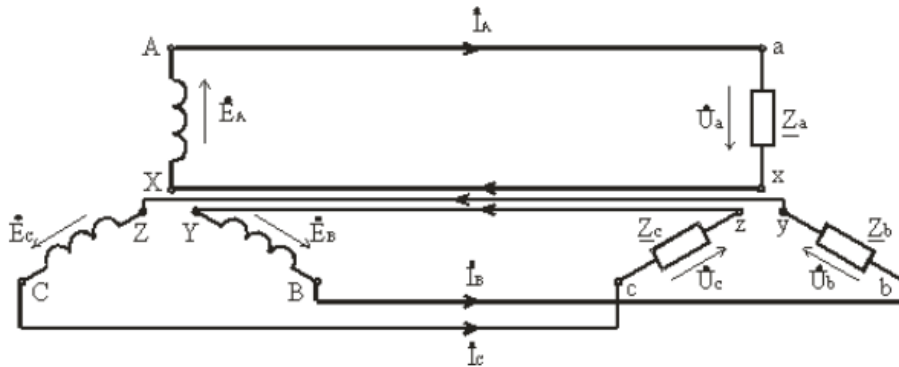
Векторна діаграма трифазного симетричної системи ЕРС

З векторних діаграм випливає, що для симетричної трифазної системи геометрична сума векторів ЕРС всіх фаз дорівнює нулю: $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

Систему ЕРС, в якій ЕРС фази В відстає по фазі від ЕРС фази А, а ЕРС фази С по фазі - від ЕРС фази В, називають системою прямої послідовності. Якщо змінити напрямок обертання ротора генератора, то послідовність фаз зміниться (рис. б) і буде називатися зворотного.

Послідовність фаз визначає напрямок обертання трифазних двигунів. Для визначення послідовності фаз є спеціальні прилади - Фазопоказники.

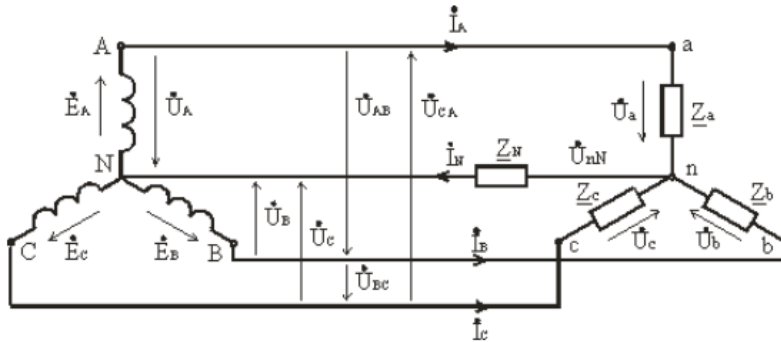
У період зародження трифазних систем були спроби використовувати незв'язану систему, в якій фази обмотки генератора не були електрично з'єднані між собою і кожна фаза з'єднувалася зі своїм приймачем двома проводами (рис.). Такі системи не отримали застосування внаслідок їх неекономічності: для з'єднання генератора з приймачем необхідно шість проводів



Більш досконалыми і економічними є пов'язані ланцюга, в яких фази обмотки електрично з'єднані між собою. Найбільш поширеними є сполуки "зірка" і "трикутник". При цьому спосіб з'єднання фаз джерел і фаз споживачів в трифазних системах можуть бути різними. Фази джерела зазвичай з'єднані "зіркою", фази споживачів з'єднуються або "зіркою", або "трикутником".

З'єднання фаз генератора і приймача зіркою

При з'єднання фаз обмотки генератора (або трансформатора) зіркою їх кінці X, Y і Z з'єднують в одну спільну точку N, звану нейтральною точкою (або нейтраллю). Кінці фаз приймачів (Z_a , Z_b , Z_c) також з'єднують в одну точку n. Таке з'єднання називається з'єднання зірка.



Провід А-а, В-в і С-с, з'єднують початку фаз генератора і приймача, називаються лінійними, провід N-n, що з'єднує точку N генератора з точкою n приймача, - нейтральним.

Трифазний ланцюг з нейтральним дротом буде чьотирьох, без нейтрального проводу - трєхпроводним.

У трифазних ланцюгах розрізняють фазні та лінійні напруги. Фазна напруга U_ϕ - напруга між початком і кінцем фази або між лінійним проводом і нейтраллю (U_A, U_B, U_C у джерела; U_a, U_b, U_c у приймача). Якщо опором проводів можна знехтувати, то фазну напругу в приймачі вважають таким же, як і в джерелі. ($U_A = U_a, U_B = U_b, U_C = U_c$). За умовно позитивні напрямки фазних напруг приймають напрямки від початку до кінця фаз.

Лінійна напруга ($U_\text{л}$) - напруга між лінійними проводами або між однойменними виводами різних фаз (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}). Умовно позитивні напрямки лінійних напруг прийняті від точок, відповідних першому індексу, до точок відповідним другому індексу.

За аналогією з фазними і лінійними напругами розрізняють також фазні та лінійні струми:

- Фазні (I_ϕ) – це струми в фазах генератора і приймачів.
- Лінійні ($I_\text{л}$) – струми в лінійних проводах.

При з'єднанні в зірку фазні та лінійні струми дорівнюють $I_\phi = I_\text{л}$.

Діючі значення лінійних напруг: $U_\text{л} = 2U_\phi \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_\phi$.

Передбачені ГОСТом лінійні та фазні напруги для ланцюгів низької напруги зв'язані між собою співвідношеннями:

$$U_\text{л} = 660\text{В}; U_\phi = 380\text{В};$$

$$U_\text{л} = 380\text{В}; U_\phi = 220\text{В};$$

$$U_\text{л} = 220\text{В}; U_\phi = 127\text{В}.$$

Приймачі, що включаються в трифазний ланцюг, можуть бути або однофазними (електричні лампи розжарювання та інші освітлювальні прилади,

різні побутові прилади, однофазні двигуни і т.д.), або трифазними (відносяться трифазні асинхронні двигуни й індукційні печі).

13. Енергетичні характеристики трифазних ланцюгів. Потужність трифазної системи.

У трифазних ланцюгах, так само як і в однофазних, користуються поняттями активної, реактивної і повної потужностей.

З'єднання споживачів зіркою

У загальному випадку несиметричного навантаження активна потужність трифазного приймача дорівнює сумі активних потужностей окремих фаз

$$P = P_a + P_b + P_c,$$

$$\text{Де } P_a = U_a I_a \cos \varphi_a; P_b = U_b I_b \cos \varphi_b; P_c = U_c I_c \cos \varphi_c;$$

$U_a, U_b, U_c; I_a, I_b, I_c$ - фазні напруги і струми;

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ - кути зсуву фаз між напругою та струмом.

Реактивна потужність відповідно дорівнює алгебраїчній сумі реактивних потужностей окремих фаз

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c,$$

$$\text{Де } Q_a = U_a I_a \sin \varphi_a; Q_b = U_b I_b \sin \varphi_b; Q_c = U_c I_c \sin \varphi_c.$$

Повна потужність окремих фаз

$$S_a = U_a I_a; S_b = U_b I_b; S_c = U_c I_c.$$

Повна потужність трифазного приймача

При симетричній системі напруг ($U_a = U_b = U_c = U_\phi$) і симетричному навантаженні ($I_a = I_b = I_c = I_\phi$; $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$) фазні потужності дорівнюють $P_a = P_b = P_c = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi$; $Q_a = Q_b = Q_c = Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi$.

Активна потужність симетричного трифазного приймача

$$P = 3 P_\phi = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi.$$

Аналогічно висловлюється і реактивна потужність

$$Q = 3 Q_\phi = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi.$$

Повна потужність

$$S = 3 S_\phi = 3 U_\phi I_\phi.$$

Звідси випливає, що в трифазного ланцюга при симетричній системі напруг і симетричному навантаженні досить виміряти потужність однієї фази і потроїти результат.

З'єднання споживачів трикутником

У загальному випадку несиметричного навантаження активна потужність трифазного приймача дорівнює сумі активних потужностей окремих фаз

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca},$$

$$\text{Де } P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab}; P_{bc} = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc}; P_{ca} = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca};$$

$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}; I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$ - фазні напруги і струми;

$\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}$ - кути зсуву фаз між напругою та струмом.

Реактивна потужність відповідно дорівнює алгебраїчній сумі реактивних потужностей окремих фаз

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca},$$

$$\text{Де } Q_{ab} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab}; Q_{bc} = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc}; Q_{ca} = U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca}.$$

Повна потужність окремих фаз

$$S_{ab} = U_{ab} I_{ab}; S_{bc} = U_{bc} I_{bc}; S_{ca} = U_{ca} I_{ca}.$$

Повна потужність трифазного приймача

При симетричній системі напруг ($U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{\phi}$) і симетричному навантаженні ($I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\phi}$; $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$) фазні потужності дорівнюють $P_{ab} = P_{bc} = P_{ca} = P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$; $Q_{ab} = Q_{bc} = Q_{ca} = Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi$.

Активна потужність симетричного трифазного приймача

$$P = 3 P_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi.$$

Аналогічно висловлюється і реактивна потужність

$$Q = 3 Q_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi.$$

Повна потужність

$$S = 3 S_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi}.$$

Так як за номінальні величини зазвичай приймають лінійні напруги і струми, то потужності зручніше виражати через лінійні величини U_l і I_l .

При з'єднанні фаз симетричного приймача зіркою $U_{\phi} = U_l / \sqrt{3}$, $I_{\phi} = I_l$, при з'єднанні трикутником $U_{\phi} = U_l$, $I_{\phi} = I_l / \sqrt{3}$. Тому незалежно від схеми з'єднання фаз приймача активна потужність при симетричному навантаженні визначається однією і тією ж формулою

$$P = U_l I_l \cos \varphi.$$

де U_l і I_l - лінійна напруга і струм; $\cos \varphi$ - фазний.

Зазвичай індекси "л" і "ф" не вказують і формула приймає вигляд

$$P = U I \cos \varphi.$$

Відповідно реактивна потужність

$$Q = U I \sin \varphi.$$

і повна потужність

$$S = U I.$$

При цьому треба пам'ятати, що кут φ є кутом зрушення фаз між фазними напругою і струмом, і, що при незмінному лінійній напрузі, перемикаючи приймач із зірки на трикутник його потужність збільшується в три рази:

$$\Delta P = 3P.$$

Вимірювання активної потужності в трифазних ланцюгах

Вимірювання активної потужності в трифазних ланцюгах роблять за допомогою трьох, двох або одного ватметрів, використовуючи різні схеми їх включення. Схема включення ватметрів для вимірювання активної потужності визначається схемою мережі (трьох-або чотирипровідна), схемою з'єднання фаз приймача (зірка або трикутник), характером навантаження (симетрична або несиметрична), доступністю нейтральної точки.

При несиметричній навантаженні в чотирьох ланцюга активну потужність вимірюють трьома Ваттметрами, кожен з яких вимірює потужність однієї фази - фазну потужність.

Активна потужність приймача визначають за сумою показань трьох ватметрів

$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

$$\text{де } P_1 = U_A I_A \cos \varphi_A; P_2 = U_B I_B \cos \varphi_B; P_3 = U_C I_C \cos \varphi_C.$$

Вимірювання потужності трьома ватметри можливо при будь-яких умовах.

При симетричному приймачі та доступною нейтральної точки активну потужність приймача визначають за допомогою одного ватметра, вимірюючи активну потужність однієї фази РФ. Активна потужність всього трифазного приймача дорівнює при цьому потроєному показанню ватметра: $P = 3 P_F$.

14. Призначення, пристрій і принцип дії трансформатора.

Трансформатором називають статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно-зв'язаних обмоток і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну) систему змінного струму.

Застосування трансформаторів.

1. Для передачі і розподілу електричної енергії.

Зазвичай на електростанціях генератори змінного струму виробляють електричну енергію при напрузі 6-24 кВ, а передавати електроенергію на далекі відстані вигідно при значно більших напругах (110, 220, 330, 400, 500, і 750 кВ). Тому на кожній електростанції встановлюють трансформатори, які здійснюють підвищення напруги.

Розподіл електричної енергії між промисловими підприємствами, населеними пунктами, в містах і сільських місцевостях, а також всередині промислових підприємств проводиться за повітряними і кабельними лініями, при напрузі 220, 110, 35, 20, 10 і 6 кВ. Отже, у всіх розподільчих вузлах повинні бути встановлені трансформатори, що понижують напругу до величини 220, 380 і 660 В



2. Для забезпечення потрібної схеми включення вентилів в перетворювальних пристроях і узгодження напруги на виході і вході перетворювача. Трансформатори, застосовуються для цих цілей, називаються перетворювальними.

3. Для різних технологічних цілей: зварювання (зварювальні трансформатори), живлення електротермічних установок і ін

4. Для живлення різних ланцюгів радіоапаратури, електронної апаратури, пристроїв зв'язку і автоматики, електропобутових приладів, для розділення електричних ланцюгів різних елементів зазначених пристроїв, для узгодження напруги і пр.

5. Для включення електровимірювальних приладів і деяких апаратів (реле та ін) в електричні ланцюги високої напруги або ж в ланцюги, по яких проходять великі струми, з метою розширення меж вимірювання і забезпечення електробезпеки. Трансформатори, застосовуються для цих цілей, називаються вимірювальними.

Класифікацію трансформаторів можна провести за декількома ознаками:

1. За призначенням трансформатори поділяють на силові загального та спеціального застосування. Силові трансформатори загального застосування використовуються в лініях передачі і розподілу електроенергії. Для режиму їх роботи характерна частота змінного струму 50Гц і дуже малі відхилення первинної і вторинної напруг від номінальних значень. До трансформаторів спеціального призначення відносяться силові спеціальні (пічні, випрямні, зварювальні, радіотрансформатори), вимірювальні і випробувальні трансформатори, трансформатори для перетворення числа фаз, форми кривої ЕРС, частоти і т.д.

2. По виду охолодження - з повітряним (сухі трансформатори) і масляним (масляні трансформатори) охолодженням.

3. По числу фаз на первинній стороні - однофазні та трифазні.

4. За формою магнітопровода - стрижневі, броньові, тороїдальні.

5. За кількістю обмоток на фазу - двохобмотувальні, трьохобмотувальні, багатообмотувальних (більше трьох обмоток).

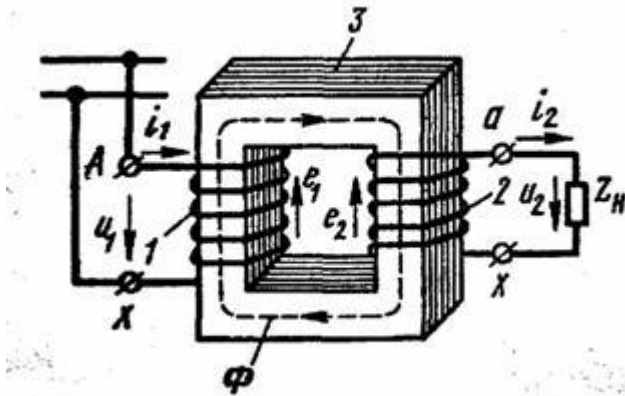
6. По конструкції обмоток - з концентричними і дисковими (чергуються) обмотками.

Принцип дії трансформатора

Електромагнітна схема однофазного двохобмотувального трансформатора складається з двох обмоток, розміщених на замкнутому магнітопроводі, який виконаний з феромагнітного матеріалу. Застосування феромагнітного магнітопроводу дозволяє підсилити електромагнітний зв'язок між обмотками, тобто зменшити магнітний опір контуру, по якому проходить магнітний потік трансформатора. Первинну обмотку 1 підключають до джерела змінного струму - електричної мережі з напругою мережі u_1 . До вторинної обмотці 2 приєднують опір навантаження Z_n .

Обмотку вищої напруги називають обмоткою вищої напруги (ВН), а низької напруги - обмоткою нижчої напруги (НН). Початки і кінці обмотки ВН позначають буквами А і Х; обмотки НН - буквами а і х.

При підключенні до мережі в первинній обмотці виникає змінний струм i_1 , який створює змінний магнітний потік Φ , що замикається по магнітопроводу. Потік Φ індукуює в обох обмотках змінні ЕРС - e_1 і e_2 пропорційні (відповідно до закону Максвелла) числу витків w_1 і w_2 відповідної обмотки і швидкості зміни потоку $d\Phi / dt$.



Таким чином, миттєві значення ЕРС, індуковані в кожній обмотці.

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad \Rightarrow \quad E_1/E_2 = e_1/e_2 = w_1/w_2.$$

Якщо знехтувати падіннями напруги в обмотках трансформатора, які зазвичай не перевищують 3-5% від номінальних значень U_1 і U_2 , і вважати $E_1 \approx U_1$ і $E_2 \approx U_2$, то отримаємо

$$U_1 / U_2 \approx w_1 / w_2.$$

Підбираючи відповідним чином числа витків обмоток, при заданій напрузі U_1 можна отримати бажану напругу U_2 . Якщо необхідно підвищити вторинну напругу, то число витків w_2 беруть більше числа w_1 ; такий трансформатор називають **підвищувальним**. Якщо потрібно зменшити напругу U_2 , то число витків w_2 беруть меншим w_1 ; такий трансформатор називають **знижуючим**.

Відношення ЕРС $E_{ВН}$ обмотки вищої напруги до ЕРС $E_{НН}$ обмотки нижчої напруги (або відношення їх чисел витків) називають коефіцієнтом трансформації

$$n = \frac{E_{ВН}}{E_{НН}} = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}} \quad U_1 / U_2 = I_2 / I_1 = w_1 / w_2 = n.$$

Коефіцієнт n завжди більше одиниці.

При зменшенні вторинної напруги в n разів у порівнянні з первинним, струм i_2 у вторинній обмотці відповідно збільшиться в n разів.

У системах передачі і розподілу енергії в ряді випадків застосовують трьохобмотувальні трансформатори, а в пристроях радіоелектроніки та автоматики – багатообмотувальні трансформатори. У таких трансформаторах

на магнітопроводі розміщують три або більше число ізольованих один від одного обмоток, що дає можливість при живленні однієї з обмоток отримувати два або більше число різних напруг (U_2, U_3, U_4 і т.д.) для електропостачання двох або більшої кількості груп споживачів. У триобмоткових силових трансформаторах розрізняють обмотки вищої, нижчої та середньої (СН) напруги.

У трансформаторі перетворюються тільки напруги і струми. Потужність ж залишається приблизно постійною (вона трохи зменшується через внутрішні втрати енергії в трансформаторі). Отже, повна потужність споживана з мережі

$$S_1 = U_1 I_1 \approx S_2 = U_2 I_2 \text{ практично повністю виділяється на навантаженні}$$

Трансформатор може працювати тільки в колах змінного струму.

Важливою властивістю трансформатора, використовуваним у пристроях автоматики і радіоелектроніки, є здатність його перетворювати опір навантаження. Якщо до джерела змінного струму підключити навантаження з опором R через трансформатор з коефіцієнтом трансформації n , то для ланцюга джерела

$$R' = \frac{P_1}{I_1^2} \approx \frac{P_2}{I_1^2} \approx \frac{I_2^2 R}{I_1^2} \approx n^2 R,$$

де: P_1 – потужність, споживана трансформатором від джерела змінного струму, Вт;

$P_2 = I_2^2 R \approx P_1$ – потужність, споживана навантаженням з опором R від трансформатора.

Таким чином, трансформатор змінює значення опору навантаження R в n^2 разів. Ця властивість широко використовується при розробці електричних схем для узгодження опорів навантаження з внутрішнім опором джерел електричної енергії.

14. Режим роботи трансформатора.

Режим холостого ходу

Трансформатор може працювати в режимі холостого ходу, коли вторинне коло розімкнене (навантаження відсутнє), тобто $Z=\infty$; $I=0$. За допомогою дослідження холостого ходу можна визначити ККД трансформатора, коефіцієнт трансформації, а також втрати в осерді.

У режимі холостого ходу для трансформатора з сердечником з магнітом'якого матеріалу струм холостого ходу характеризує величину втрат в осерді (на вихрові струми і на гістерезис) та реактивну потужність перемагнічування магнітопроводу. Потужність втрат можна обчислити, помноживши активну складову струму холостого ходу на напругу, що подається на трансформатор.

Для трансформатора без феромагнітного осердя втрати на перемагнічування відсутні, і струм холостого ходу визначається опором

індуктивності первинної обмотки, який пропорційний до частоти змінного струму та величини індуктивності.

Режим короткого замикання

Режим короткого замикання можна отримати в результаті замикання вторинної обмотки накоротко. Це аварійний режим, що може призвести до виходу з ладу трансформатора. При цьому струм у вторинній обмотці може бути у 20...30 разів більшим за номінальний. Тому слід відрізнити режим короткого замикання від досліду короткого замикання. За допомогою останнього можна визначити втрати корисної потужності на нагрівання проводів в колі трансформатора.

При дослідженні режиму короткого замикання, на первинну обмотку трансформатора подається змінна напруга невеликої величини, виводи вторинної обмотки закорочують. Величину напруги на вході встановлюють такою, щоб струм короткого замикання дорівнював номінальному (розрахунковому) струму трансформатора. У таких умовах величина напруги короткого замикання характеризує втрати в обмотках трансформатора, втрати на омичний опір. Потужність втрат можна обчислити помноживши напругу короткого замикання на струм короткого замикання.

Даний режим широко використовується у вимірювальних трансформаторах струму.

Режим навантаження

Режим роботи трансформатора при якому вторинна обмотка замкнута на опір називається режимом роботи трансформатора під навантаженням. При такому режимі роботи у вторинній обмотці буде протікати струм I_S , який створить свій магнітний потік Φ_S , який за правилом Ленца має зменшити зміни магнітного потоку в осерді. Це призводить до автоматичного збільшення сили струму в колі первинної обмотки. Збільшення сили струму в колі первинної обмотки відбувається згідно із законом збереження енергії:

$$I_P \cdot U_P \approx I_S \cdot U_S \text{ або } \frac{U_P}{U_S} \approx \frac{I_S}{I_P}.$$

Це означає, що підвищуючи за допомогою трансформатора напругу у кілька разів, ми в стільки ж разів зменшуємо силу струму (та навпаки). Отже, трансформатор перетворює змінний струм таким чином, що добуток сили струму на напругу приблизно однаковий у первинній і вторинній обмотках.

15. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії трансформатора.

В процесі роботи трансформатора під навантаженням частина активної потужності P_1 , що надходить в первинну обмотку з мережі, розсіюється в трансформаторі на покриття втрат. В результаті активна потужність P_2 , що надходить в навантаження, виявляється меншою потужності P_1 на величину сумарних втрат в трансформаторі ΔP :

$$P_1 = P_2 + \Delta P$$

В трансформаторі існує два види втрат — магнітні і електричні.

Магнітні втрати P_m в сталюму магнітопроводі, по якому замикається магнітний потік Φ_{max} , складаються з витрат на гістерезис P_H , вихрові струми $P_{вх}$:

$$P_m = P_H + P_{вх}.$$

Магнітні втрати прямо пропорційні масі магнітопроводу і квадрату магнітної індукції в ньому. Вони також залежать від властивостей сталі, з якої виготовлений магнітопровід. Зменшенню втрат на гістерезис сприяє виготовлення магнітопроводу з феромагнітних матеріалів (електротехнічної сталі), що володіють невеликою коерцетивною силою (вузькою петлею гістерезису). Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопровід виготовляють шихтованим (з тонких сталюх пластин, ізолюваних одна від одної тонким шаром лаку або оксидної плівки) або витим з сталюї стрічки. Магнітні втрати залежать також і від частоти змінного струму: з підвищенням частоти f магнітні втрати підвищуються за рахунок втрат на гістерезис P_H та вихрові струми $P_{вх}$.

Раніше було встановлено, що головний магнітний потік в магнітопроводі не залежить від навантаження трансформатора, тому при змінах навантаження магнітні втрати залишаються практично незмінними.

Електричні втрати - це втрати в обмотках трансформатора, що обумовлені нагрівом обмоток струмами, що проходять по ним.

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2.$$

Електричні втрати є змінними, так як їх величина пропорційна квадрату струмів в обмотках. Електричні втрати при будь-якому струмі навантаження I_2 трансформатора, Вт,

$$P_e = P_{e.ном} b^2,$$

де $P_{e.ном}$ — електричні втрати при номінальному струмі навантаження; $b = I_2/I_{2ном}$ — коефіцієнт навантаження, характеризує ступінь навантаження трансформатора.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора являє собою відношення активних потужностей на його виході P_2 і вході P_1 :

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + P_m + P_e).$$

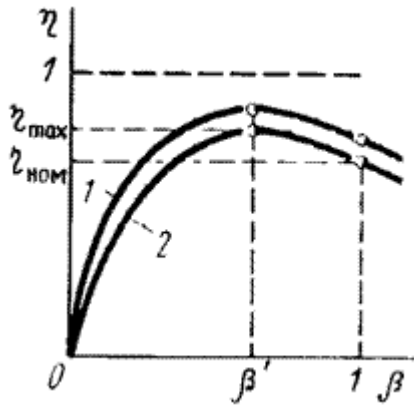
Активна потужність на виході трансформатора, Вт,

$$P_2 = S_{ном} b \cos \varphi_2,$$

де $S_{ном}$ — номінальна потужність трансформатора, В×А; $\cos \varphi_2$ — коефіцієнт потужності навантаження.

Отримаємо формулу ККД трансформатора, зручну для практичних розрахунків:

$$\eta = (S_{ном} b \cos \varphi_2) / (S_{ном} b \cos \varphi_2 + P_m + P_{e.ном} b^2). \quad (2.1.28)$$



Залежність $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 1$ (графік 1) і $\cos \varphi_2 < 1$ (графік 2)

Таким чином, ККД трансформаторів залежить від величини навантаження β і від її характеру $\cos \varphi_2$. Графічно ця залежність показана на рис. Максимальне значення ККД η_{\max} відповідає навантаженню $\beta\phi$, при якому електричні втрати дорівнюють магнітним ($P_{e.\text{ном}} \beta\phi^2 = P_m$).

Номінальне значення ККД $\eta_{\text{ном}}$ тим вище, чим більша номінальна потужність трансформатора $S_{\text{ном}}$.

Наприклад,

$\eta_{\text{ном}} = 0,70, 0,85$ при $S_{\text{ном}} \in 100 \text{ В} \times \text{А}$

та

$\eta_{\text{ном}} = 0,90, 0,95$ при $S_{\text{ном}} \in 10 \text{ кВ} \times \text{А}$.

У більш потужних трансформаторів ККД може досягати $\eta_{\text{ном}} = 0,98, 0,99$.

16. Принцип дії та призначення електричних машин.

Електрична машина це електромеханічний пристрій призначений для перетворення електричної енергії в механічну (електричний двигун) або механічної енергії в електричну (електричний генератор).

Електрична енергія в переважній більшості виробляється на електростанціях з допомогою генераторів. Споживання електричної енергії полягає у перетворенні її у інші види енергії: теплову, хімічну, механічну, енергію випромінювання. Більшість електроенергії що виробляється, перетворюється з допомогою електричних двигунів на механічний рух (транспортні засоби, побут, виробництво).

Електродвигун – основний елемент електропривода робочих машин. В даний час електричний привод є домінуючим у порівнянні з іншими видами привода по причині того що електрична енергія відносно легко керується, транспортується, розподіляється та генерується.

Існують найрізноманітніші конструктивні виконання електричних машин, але більша їх частина побудована на принципі обертального руху однієї частини відносно нерухомої частини. Нерухома частина має назву статор, обертова частина розташована в середині статора і називається ротор. Одна із вказаних частин машини створює магнітне поле, а на іншій частині розташовується робоча обмотка. Статор і ротор мають шихтовану конструкцію

(тобто набрані із великої кількості тонких ізолюваних одна від одної пластин електротехнічної сталі) і володіють невеликим магнітним опором.

Принцип дії електричних машин базується на законах електричних і магнітних явищ: законі електромагнітної індукції та законі Ампера. Закон електромагнітної індукції полягає в тому, що при русі провідника в магнітному полі із швидкістю v в напрямку, перпендикулярному вектору електромагнітної індукції B , в ньому індукується електрорушійна сила E .

$$E = Blv,$$

де l – активна довжина провідника, тобто та частина, що знаходиться в магнітному полі.

Якщо провідник замкнути, то в цьому провіднику виникне електричний струм I . При взаємодії струму з зовнішнім магнітним полем на провідник діє електромагнітна сила, яка визначається по закону Ампера:

$$F_{em} = BIl,$$

Ця сила має напрям зустрічний зовнішній силі F , яка є причиною руху провідника.

При рівномірному русі провідника сили, що діють на провідник є рівними $F = F_{em}$. Помножимо обидві частини цього рівняння на швидкість руху провідника v , отримаємо рівняння:

$$Fv = F_{em}v;$$

$$Fv = BIlv = EI.$$

Ліва частина отриманого рівняння визначає значення механічної потужності, яка витрачається на переміщення провідника в магнітному полі; права частина – значення електричної потужності, яка виникає в замкненому контурі.

В генераторі механічна потужність Fv витрачається на переміщення провідника в магнітному полі (перпендикулярно вектору магнітної індукції), при цьому виникає електрична потужність EI .

В електродвигуні від джерела електричної енергії підводиться напруга U . При цьому на провідник діє електромагнітна сила F_{em} , під дією якої провідник рухається в магнітному полі та в ньому індукується електрорушійна сила E з напрямом, що протилежний напрузі U . Таким чином, частина напруги U , що прикладена до провідника врівноважує ЕРС, а інша складає падіння напруги в цьому провіднику:

$$U = E + Ir,$$

де r – електричний опір провідника.

Помножив обидві частини рівняння на струм, отримаємо:

$$UI = EI + I^2r.$$

Підставимо замість E значення ЕРС, отримаємо

$$UI = BlvI + I^2r = F_{em}v + I^2r.$$

З наведеного рівняння виходить, що електрична потужність UI , що надходить в електродвигун із мережі, частково перетворюється в механічну

потужність ($F_{em} v$), а частково витрачається на покриття електричних втрат в провіднику ($I^2 r$).

Викладене вище дозволяє зробити наступні висновки:

- для будь якої електричної машини обов'язкова наявність провідників та магнітного поля, які мають можливість взаємного переміщення;
- при роботі електричної машини в режимі генератора або двигуна, спостерігається процес індукування ЕРС (що визначається законом електромагнітної індукції), так і явище виникнення електромагнітних сил (визначаються законом Ампера).

На рисунку 1 наведена схема класифікації електричних машин, які отримали найбільше розповсюдження в сучасній електромеханіці та електроенергетиці.

Електричні машини класифікують за призначенням (електромашинні генератори, двигуни, електромашинні перетворювачі, електромашинні компенсатори,). Також класифікують за родом струму (змінного або постійного струму, трифазні, однофазні) та принципом дії (асинхронні, синхронні, колекторні, вентильні). Електричні машини по потужності умовно поділяють на мікро машини (потужність від часток вата до 500 Вт), машини малої (від 0,5 до 10 кВт), середньої (від 10 кВт до декількох сотень кіловат) та великої потужності (понад кілька сотень кіловат). Електричні машини по частоті обертання умовно поділяють на: тихохідні – з частотами обертання 300 об/хв; середньої швидкохідності – 300-1500 об/хв; швидкохідні – 1500-6000 об/хв; надшвидкохідні – понад 6000 об/хв. Мікромашини виконують для частот обертання від декількох оборотів в хвилину до 60000 об/хв; машини великої і середньої потужності – зазвичай до 3000 об/хв.

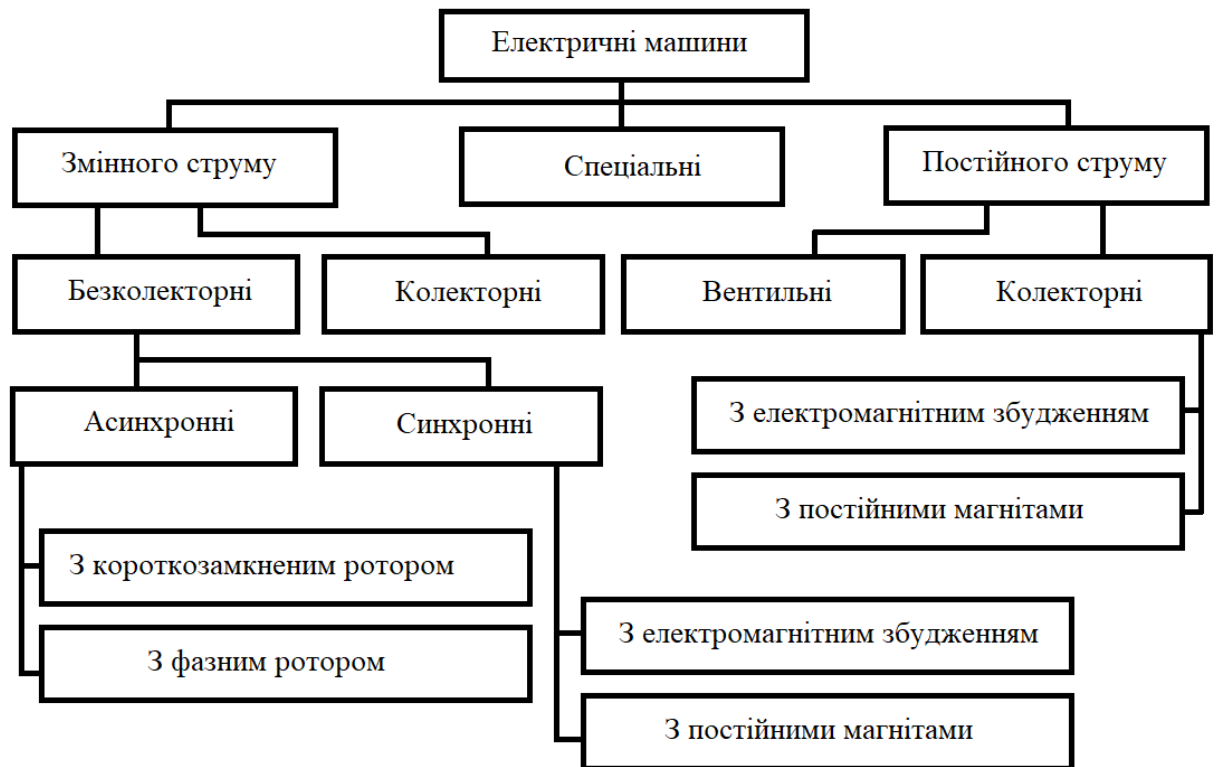


Рисунок 1. Класифікація електричних машин

Вплив на електричні машини оточуючого середовища (температура, вологість, вібрація, випромінювання і т.д.) та умов роботи призводить до створення машин різної конструкції. Відповідно, їх поділяють на машини загального і спеціального призначення.

17. Перетворення енергії в електричних машинах.

Робота електричної машини полягає у взаємному перетворенні електричної та механічної енергії. При будь-якому перетворенні енергії виникають втрати, які перетворюються в електричній машині на теплову енергію.

Основними втратами є:

- магнітні в магнітопроводі електричної машини, це втрати на гістерезис та вихрові струми;
- електричні в провідниках машини – внаслідок опору при проходженні струму відбувається нагрівання обмоток;
- механічні, що виникають в рухомих елементах машини внаслідок тертя.

Всі втрати перетворюються на тепло Q , кількість якого пропорційна потужності втрат ΣP . Таким чином, електрична машина під час роботи нагрівається до певної сталої температури, при цьому частина теплової енергії розсіюється в навколишній простір (рисунок 2).

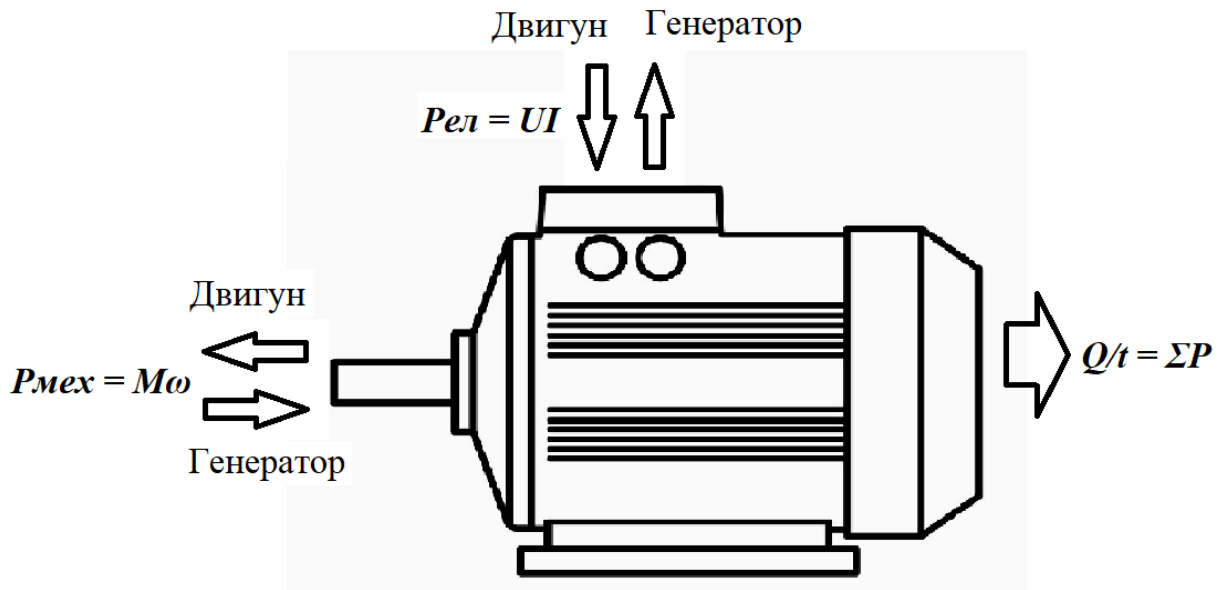


Рисунок 2. Перетворення енергії в електричній машині

Механічна потужність підводиться до машини або знімається з її валу, а електрична потужність підводиться або знімається з клем машини. Механічна потужність визначається добутком моменту M на кутову швидкість вала ω :

$$P_{\text{мех}} = M\omega.$$

Електрична потужність визначається добутком напруги U на силу струму I :

$$P_{\text{ел}} = UI \cos\varphi,$$

де $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності, який дорівнює косинусу зсуву фази змінного струму, що протікає через навантаження, відносно прикладеної до неї напруги.

Різниця між потужністю яка споживається, та корисною потужністю (яка віддається) є потужністю втрат ΣP . Коефіцієнт корисної дії (ККД) електричних машин значної одиничної потужності може сягати 99,5 %, в машинах середньої потужності – 70 - 90 %. ККД електричних машин невеликої потужності (не більше декількох сотень ват) складає до 60 %.

Електричні машини є найбільш досконалими перетворювачами енергії в порівнянні з машинами які базуються на інших принципах роботи. Високі енергетичні показники електричних машин, зручність підведення і відведення енергії, екологічність, можливість виготовлення машин широкого діапазону потужності, значний ресурс, простота та зручність обслуговування, високі регульовальні властивості – основні причини широкого впровадження електричних машин у виробництво, побут, транспорт.

Для надійної і безвідмовної роботи протягом встановленого терміну експлуатації необхідно щоб температура частин машини не перевищувала граничних значень. Саме тепловиділення обмежує потужність машини при заданих габаритах і способах охолодження. Таким чином, для збільшення потужності електричної машини необхідно збільшити її габарити або

застосувати більш ефективні способи охолодження (можна застосувати обидва способу одночасно).

Частини електричної машини, які безпосередньо приймають участь у перетворенні енергії називають активними частинами (магнітопровід, обмотки, проміжки між рухомими і нерухомими елементами). Для реалізації процесу перетворення енергії необхідна наявність конструктивних частин. Конструктивні частини забезпечують необхідне просторове розташування активних частин і можливість їх взаємного руху, підводять або відводять електричну енергію, передають механічну енергію, охолоджують машину, захищають активні частини від зовнішніх факторів, захищають персонал від струмоведучих та рухомих частин, забезпечують монтаж машини.

Електричні машини є оборотними, тобто вони можуть працювати і в генераторному, і в руховому режимі. Але машини, що випускаються електропромисловістю, зазвичай призначаються для кращої роботи в якомусь одному режимі. Це дозволяє краще пристосувати машину до вимог експлуатації, не роблячи її надмірно важкою і дорогою.

18. Характеристики електричних машин.

Номинальні дані електричної машини – це сукупність числових значень електричних та механічних параметрів, обумовлених виробником, яким відповідає машина в заданих умовах експлуатації.

Кожен електродвигун характеризується номінальними даними:

- $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність електродвигуна, кВт;
- $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга електродвигуна, В;
- $I_{\text{ном}}$ – номінальний струм електродвигуна, А;
- $n_{\text{ном}}$ – номінальна частота обертання, об/хв;
- $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності (для електродвигунів змінного струму);
- ККД - коефіцієнт корисної дії;
- з'єднання обмоток – Y (зірка) Δ (трикутник) (для трифазних електродвигунів змінного струму);
- клас нагрівальності ізоляції обмоток статора - F (буква позначає клас);
- $I_{\text{ном.ротора}}$ - номінальний струм ротора, А (для електродвигунів постійного струму та змінного струму з фазним ротором);
- режим роботи електродвигуна – S+цифра, що позначає режим роботи.

Номинальною потужністю електричної машини називають потужність, на яку розрахована ця машина за умовами її допустимого нагрівання та безаварійної роботи протягом встановленого терміну служби. Для електричних двигунів під номінальною потужністю розуміють корисну механічну потужність на валу (добуток моменту на номінальну частоту обертання валу); для генераторів — електричну потужність на затискачах машини. Номинальні потужності всіх видів електричних машин стандартизовані, також стандартизовані і номінальні частоти обертання електричних машин.

Електричні машини можуть працювати і при неномінальних умовах (зменшена або збільшена потужність, напруга або струм, відмінні від номінальних і т.д.). Однак в цьому випадку енергетичні показники машини (ККД, коефіцієнт потужності) можуть бути набагато нижче від паспортних даних.

Електричні машини випускають на стандартні напруги, узгоджені зі стандартними напругами електричних мереж. Стандартні напруги генераторів приблизно на 5-10 % вище, ніж у двигунів (наприклад, якщо стандартна напруга двигуна 220 В, то стандартна напруга генератора — 230 В і т. п.). Різниця в стандартних напругах двигунів і генераторів обумовлена втратами напруги в електричних мережах, до яких підключено генератори і двигуни.

Машини змінного струму призначені, як правило, для роботи з синусоїдальною напругою та симетричною по фазах. Неминучі відхилення від цих умов регламентуються стандартами (наприклад, тривалі відхилення по значенню напруги в мережі, що живить силове обладнання, не повинні перевищувати — 5 % та +10 % ; коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої повинен бути не більше 5 % і т. п.). Машини, що працюють спільно з вентильними перетворювачами, зазвичай мають не синусоїдальну напругу і струм, що викликає в них додаткові втрати енергії і підвищує температуру обмоток і магнітопроводів машини. Режим роботи таких машин регламентуються спеціальними технічними умовами.

Властивості електричних машин описуються математичними формулами та рівняннями, деякі можна представити графічно у вигляді функціональних залежностей. Такі графіки називають характеристиками.

Основні характеристики генераторів:

- зовнішня характеристика – залежність напруги на клеммах генератора від струму навантаження $U = f(I)$ при незмінному струмі збудження і частоті обертання ($I_z = \text{const}$ та $n = \text{const}$);
- характеристика холостого ходу – залежність напруги на клеммах генератора від струму збудження $U = f(I_z)$ в режимі холостого ходу та незмінній частоті обертання ($I = 0$ та $n = \text{const}$);
- регульовальна характеристика – залежність струму збудження від струму навантаження та напруги на виході генератора ($U = \text{const}$ та $n = \text{const}$).

Основні характеристики електричних двигунів:

- механічна характеристика – залежність частоти обертання від моменту навантаження на валу двигуна (момент опору робочого механізму) $n = f(M)$ при незмінних значеннях напруги живлення двигуна, струму збудження, опору ланцюга робочої обмотки, або для асинхронних двигунів залежність моменту на валу від ковзання $M = f(s)$, при незмінних значеннях напруги живлення U та опору в ланцюгах обмоток;
- електромеханічна характеристика – залежність частоти обертання від струму навантаження $n = f(I)$, при незмінних значеннях напруги U та опору в ланцюгах обмоток;

- регулювальна характеристика – залежність частоти обертання від регулювального параметра (напруги живлення або струму збудження);
- робочі характеристики – залежність ККД, коефіцієнта потужності, робочого струму, частоти обертання від навантаження двигуна (корисної потужності P_2).

Вид механічних характеристик найбільш розповсюджених двигунів в електроприводі показаний на рисунку 5.3.

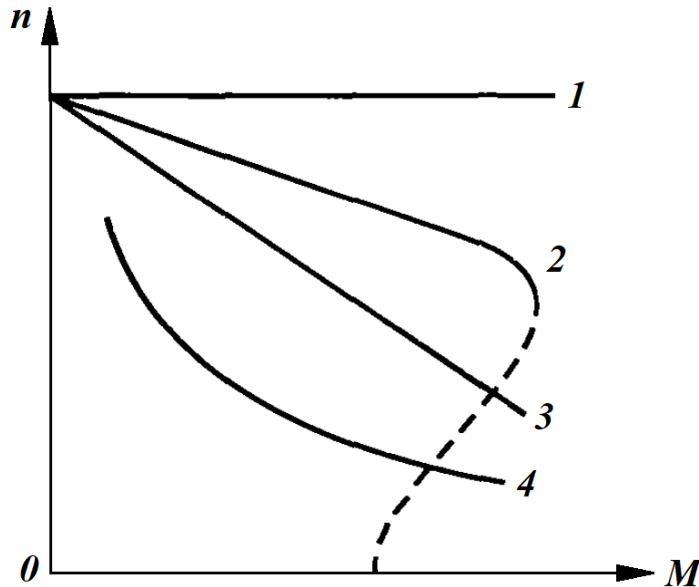


Рисунок 3. Механічні характеристики електродвигунів:

1 – синхронного; 2 – асинхронного; 3 – постійного струму з незалежним збудженням; 4 – постійного струму з послідовним збудженням

При передачі обертального руху робочому механізму двигун випробовує протидію з боку цього механізму – це називається статичний момент опору. Статичні моменти поділяють на активні і реактивні.

Активний статичний момент – діє незмінно в одному напрямку, незалежно від напрямку руху механізму (діє навіть при нерухомому механізмі), створюється постійно діючими зовнішніми силами (приклад – статичний момент опору, що створюється вантажем у підйомальному механізмі типу «лебідка»). Механічна характеристика активного статичного моменту $n = f(M_c)$ має вигляд вертикальної прямої розташованої у другому та третьому квадрантах координатної площини (рис. 5.4, а). Тобто при підйманні вантажу активний статичний момент направлений проти моменту двигуна, а при опусканні вантажу – згідно з цим моментом.

Реактивні статичні моменти діють тільки в рухомих механізмах і направлені завжди проти обертового моменту двигуна. При зміні напрямку обертання також змінюється і напрям дії реактивного статичного моменту (рис. 5.4, б). Реактивні моменти обумовлені силами тертя в рухомих частинах механізму. Також реактивні статичні моменти більшості механізмів залежать не тільки від напрямку, а і від швидкості руху. При цьому механічні характеристики реактивних статичних моментів можуть мати різну форму,

наприклад, у центробіжних вентиляторів, центробіжних насосів та інших аналогічних механізмів статичний момент пропорційний квадрату частоти обертання ($M \sim n^2$). Механічна характеристика таких механізмів має вигляд параболи (рис. 5.4, в).

Металообробні станки при постійній потужності ($P = M_c n = \text{const}$) мають механічну характеристику, при якій з ростом реактивного статичного моменту опору M_c частота обертів n зменшується (рис. 5.4, г).

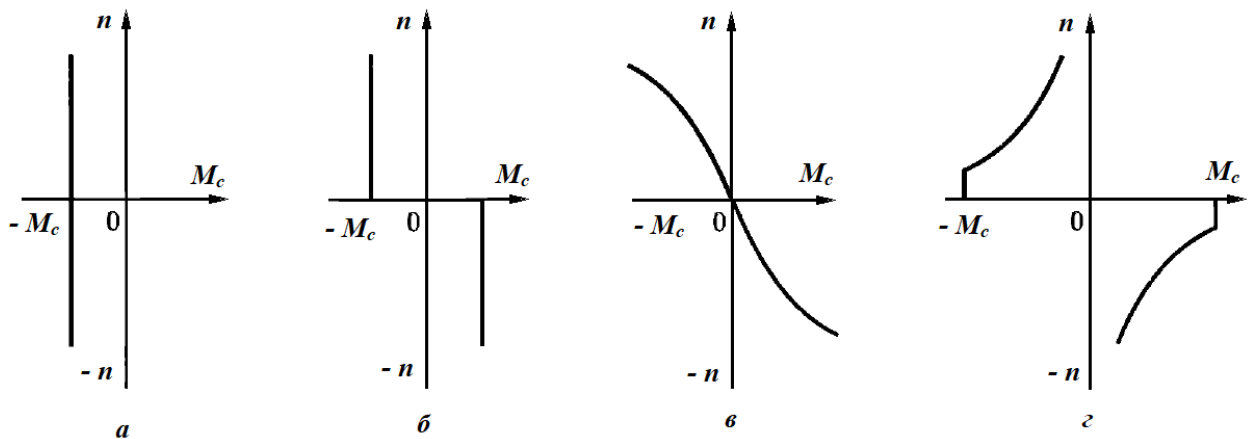


Рисунок 5.4. Наближені механічні характеристики механізмів

Усталений режим двигуна і робочої машини – це їх спільна робота при незмінних значеннях частоти обертання та електромагнітного моменту. Цьому режиму відповідає точка на механічній характеристиці, в якій має місце рівність обертового моменту двигуна та статичного моменту опору робочого механізму. Для визначення координати точки усталеного режиму слід побудувати в одних координатах механічні характеристики двигуна та робочого механізму.

При оцінці характеристик використовується поняття жорсткість характеристик. Якісно жорсткість характеристик визначається відношенням різниці моментів, що розвиваються двигуном, до відповідної різниці частот обертання:

$$\beta = \Delta M / \Delta n,$$

де $\Delta M = M_2 - M_1$ – різниця моментів;

$\Delta n = n_1 - n_2$ – різниця частот обертання.

Для прямолінійної механічної характеристики жорсткість визначається тангенсом кута α нахилу характеристики до осі ординат: $\beta = \text{tg } \alpha$. Як що механічна характеристика прямолінійна, то жорсткість визначається в робочій точці як тангенс кута нахилу дотичної, проведеної в цій точці, до осі ординат. Чим більше кут, тим більше жорсткість, при $\alpha = 90^\circ$ механічна характеристика паралельна осі абсцис та є абсолютно жорсткою (рис. 5.3, графік 1).

Електричний двигун повинен володіти стійкістю, тобто в ньому повинна автоматично підтримуватись задана частота обертання при впливі збурюючих факторів.

19. Режими роботи електричних машин.

Режим роботи електричної машини – це встановлений порядок чергування періодів, що характеризується величиною та тривалістю навантаження, відключення, гальмування, пуску та реверсу під час роботи. Режими роботи електричних машин визначаються технологічними процесами, які реалізуються цими машинами. Забороняється експлуатувати електродвигуни (за винятком гострої необхідності або в аварійних ситуаціях) у не властивих для них режимах роботи.

Таблиця 5.1. Режими роботи електродвигунів

Режим роботи	Характеристика режиму
Тривалий режим S1	Режим роботи електродвигуна, коли при постійному номінальному навантаженні $P_{ном}$ робота електродвигуна триває так довго, що температура ($\tau_{вст}$) перегріву всіх його частин встигає досягти значень, що встановилися. Розрізняють тривалий режим із незмінним навантаженням і тривалий режим із змінним навантаженням.
Короткочасний режим S2	Режим роботи електродвигуна, у якому періоди постійного номінального навантаження чергуються з періодами відключення електродвигуна. При цьому періоди роботи настільки короткочасні, що температура всіх частин електродвигуна не встигає досягти значень, що встановилися, а періоди відключення настільки тривалі, що всі частини електродвигуна встигають досягти температури навколишнього середовища. В умовному позначенні вказується тривалість роботи електродвигуна, наприклад S2-30хв (стандартно: 10; 30; 60 та 90 хвилин).
Повторно-короткочасний режим S3	Режим роботи електродвигуна, при якому короткочасні режими роботи електродвигуна чергуються з періодами його відключення (паузами), причому за період роботи перевищення температури не встигає досягти значень, що встановилися, а за період паузи частини електродвигуна не встигають охолотитися до температури навколишнього середовища. Режим характеризується відносною тривалістю включення (ТВ) у відсотках: S3-40% - ТВ=40% (електродвигун 40% часу працює, 60% - відпочиває). Дозволяється переклад електродвигуна з режиму S1 в режим роботи S3, при цьому потужність електродвигуна може бути збільшена: при ТВ=60% - на 30%; за ТВ=40% - на 60%; при ТВ=25% - на 100% і за ТВ=15% - в 2,6 разів.

Розглянуті три номінальні режими є основними. В каталогах на двигуни, які призначені для роботи в цих режимах, вказані номінальні дані, що відповідають режиму роботи. Стандартом передбачені ще додаткові режими:

- повторно-короткочасний режим S4 з частими пусками (кількість включень за годину 30, 60, 120, 240);
- повторно-короткочасний режим S5 з частими пусками та електричним гальмуванням в кінці кожного циклу;
- перемежований режим S6 з частими реверсами та електричним гальмуванням;
- перемежований режим S7 з частими пусками, реверсами та електричним гальмуванням;
- перемежований режим S8 з двома і більше різними частотами обертання.

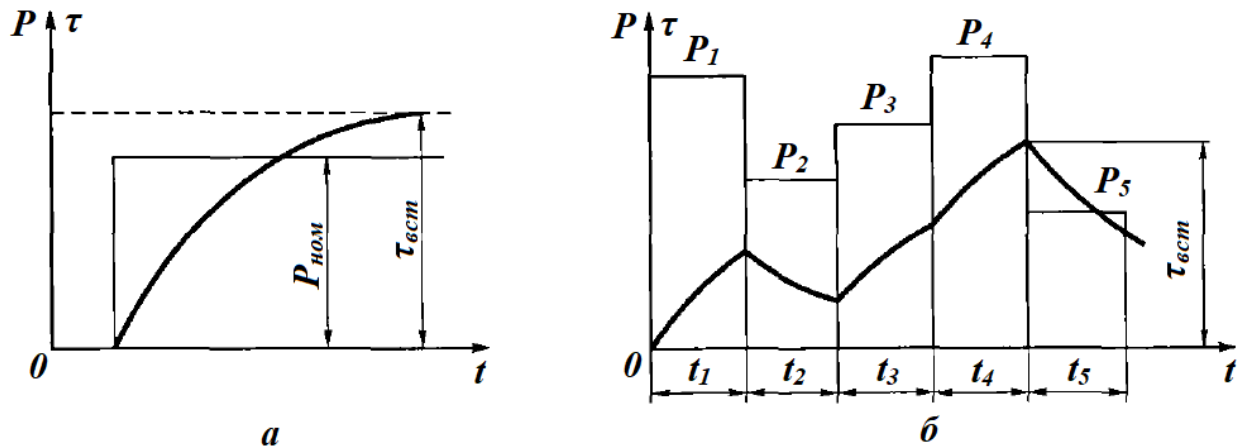


Рисунок 5. Навантажувальна діаграма тривалого режиму (S1) роботи двигуна: а – із незмінним навантаженням, б – із змінним навантаженням

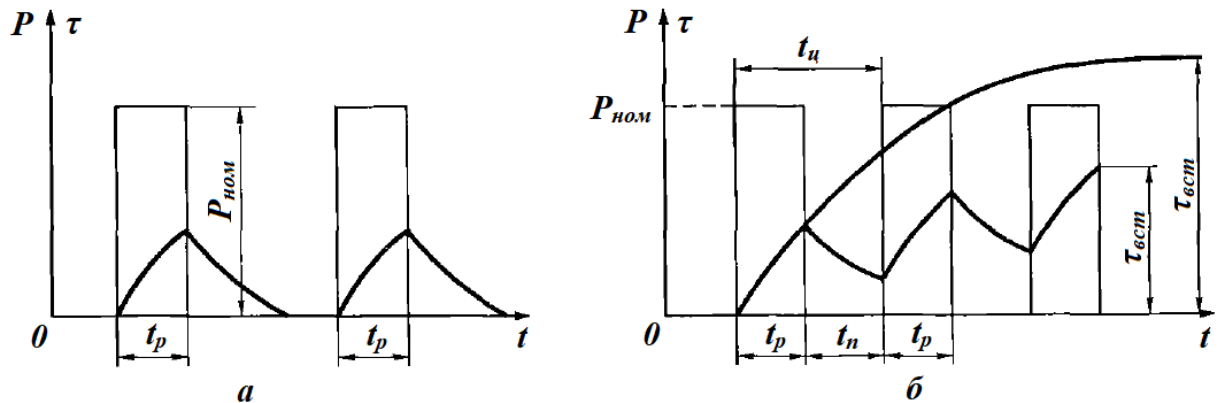


Рисунок 5.6. Навантажувальна діаграма режимів роботи двигуна: а – короткочасний режим S2, б – повторно-короткочасний режим S3

20. Захист від зовнішніх впливів електричних машин.

Конструктивне виконання електричної машини багато в чому визначають вимоги, що пред'являються до захисту її від зовнішніх впливів. В залежності від цього стандарт встановлює буквено-цифрове позначення виконань електричних машин, що складається з двох букв IP (International Protection) і двох цифр (таблиця 5.2). Перша цифра (від 0 до 6) характеризує ступінь захисту обслуговуючого персоналу від зіткнення з струмоведучими і обертовими частинами машини і від потрапляння всередину її твердих сторонніх предметів. Друга цифра (від 0 до 8) характеризує ступінь захисту машини від проникнення в неї вологи.

Таблиця 2. Цифри в позначенні ступенів захисту електричних машин

Номер цифри	Цифра	Ступінь захисту
Перша цифра	0	Спеціальний захист відсутній
	1	Захист від проникнення твердих тіл діаметром більше 50 мм, виключено випадковий дотик до струмоведучих або рухомих частин всередині оболонки частиною тіла, наприклад рукою
	2	Захист від проникнення твердих тіл діаметром більше 12 мм, виключено дотик пальцями до небезпечних частин усередині оболонки
	3	Захист від проникнення інструментів, дроту тощо, діаметром або товщиною 2,5 мм
	4	Захист від проникнення твердих тіл розміром понад 1 мм
	5	Захист від пилу. Пил усередину оболонки не може проникати у кількості, що порушує роботу електродвигуна.
Друга цифра	0	Захист відсутній
	1	Захист від крапель води, що вертикально падають
	2	Захист від крапель води при нахилі оболонки до 15°
	3	Захист від дощу під кутом до 60°
	4	Захист від бризок у будь-якому напрямку
	5	Захист від водяних струменів у будь-якому напрямку
	6	Захист від впливу морських хвиль
	7	Захист при короткочасному зануренні у воду на певну глибину
	8	Захист при тривалому зануренні у воду за умов, визначених виробником

Розрізняють такі види виконання електричних машин: відкрите (IP00), захищене (IP21 – IP22), краплезахищене (IP23 – IP24), водозахищене (IP55 – IP56), пилозахищене (IP65 – IP66), закрите (IP44 – IP54), герметичне (IP67 –

IP68), вибухозахищене, вологостійке, морозостійке, хімічностійке, тропікостійке.