

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА АВТОМАТИКА

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Частина 1. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра «Енергетики та електротехнічних систем»

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА АВТОМАТИКА
КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Частина 1. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

для студентів 2 та 1 с.т. курсів спеціальності
208 "Агроінженерія"
ОС «Бакалавр»
денної та заочної форм навчання

УДК 696.6

Укладачі: к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем – Сіренко В. Ф., ст. викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем – Савойський О.Ю., асистент кафедри енергетики та електротехнічних систем – Вольвач Т.С.

Електротехніка та автоматика. Конспект лекцій для студентів 2 та 1 с.т. курсів спеціальності 208 "Агроінженерія" ОС «Бакалавр» денної та заочної форм навчання. Частина 1. Електротехніка. – Суми: Сумський національний аграрний університет, 2022. - 78 с.

Конспект лекцій складено з метою допомогти студентам спеціальності 208 «Агроінженерія» під час підготовки до практичних занять, лабораторних робіт, заліків та виконання студентами денної та заочної форм навчання контрольної роботи.

Рецензенти:

Соларьов О.О. - кандидат технічних наук, доцент кафедри тракторів, с.г. машин та транспортних технологій.

Саржанов О.А. - кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедри експлуатації техніки СНАУ

Відповідальний за випуск: к.т.н., ст. викладач, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем – Чепіжний А.В.

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою інженерно-технологічного факультету (протокол № 6 від 25 травня 2022 року).

Зміст

Тема 1. Електричне коло постійного струму.....	6
Тема 2. Електромагнетизм і магнітні кола.....	16
Тема 3. Електричне коло змінного струму.....	30
Тема 4. Трифазні електричні системи.....	43
Тема 5. Трансформатори.....	52
Тема 6. Електронні прилади та пристрої.....	63
Тема 7. Електропривід апаратура керування та захисту.....	69
Список використаної літератури.....	77

Тема 1. Електричне коло постійного струму

План

1. Електричне коло і його складові елементи.
2. Стандартні графічні позначення основних електротехнічних пристроїв.
3. Послідовне, паралельне і мішане з'єднання споживачів, еквівалентний опір розгалуженого кола.
4. Закон Ома для ділянки кола. Закон Ома для повного кола.
5. Робота і потужність постійного струму. Закон Джоуля-Ленца. Закони Кірхгофа.
6. Енергетичний баланс в електричному колі. Методи розрахунку електричних кіл за допомогою безпосереднього застосування законів Кірхгофа.

1. Електричне коло і його складові елементи

Сформульовані для кіл постійного струму. Закони Кірхгофа зберігають свою силу також і в колах змінного струму. Але в таких колах рівняння, складені за цими законами, зв'язують миттєві значення електричних величин. Тому наведемо відповідні формулювання законів Кірхгофа.

Перший закон Кірхгофа. Алгебраїчна сума миттєвих значень струмів віток, що сходяться у вузлі електричного кола, дорівнює нулю, тобто:

$$\sum_{k=1}^m i_k = 0,$$

де m - кількість віток, що сходяться у вузлі.

Конкретно, для приклада на приймаємо за позитивні напрямки струмів до вузла, і тоді:

$$i_1 - i_2 + i_3 - i_4 = 0.$$

У колах постійного струму, як частковий випадок, маємо, відповідно:

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

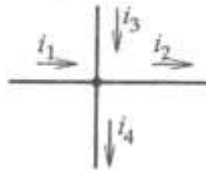


Рис. 1

Другий закон Кірхгофа. У замкненому контурі електричного кола алгебраїчна сума миттєвих значень напруги на всіх його ділянках дорівнює нулю, тобто:

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0,$$

де n - кількість елементів у контурі.

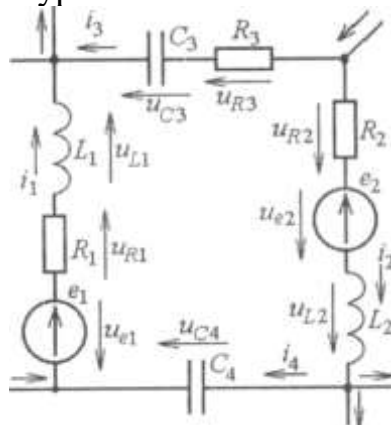


Рис. 2

Для контура, який показано, приймаємо напрямок обходу за годинниковою стрілкою і, з урахуванням зроблених позначень напруг і вказаних їхніх позитивних напрямків, отримуємо:

$$u_{R1} + u_{L1} - u_{C3} - u_{R3} + u_{R2} + u_{e2} + u_{L2} + u_{C4} - u_{e1} = 0.$$

Якщо для джерел замінити напруги на ЕРС, а саме: $u_{e1} = e_1$; $u_{e2} = e_2$, то отримуємо модифіковане рівняння: у замкненому контурі алгебраїчна сума миттєвих значень спадів напруги на пасивних елементах дорівнює алгебраїчній сумі миттєвих значень ЕРС джерел:

$$u_{R1} + u_{L1} - u_{C3} - u_{R3} + u_{R2} + u_{L2} + u_{C4} = e_1 - e_2.$$

У колах постійного струму зберігається те ж саме, тільки треба брати постійні напруги та постійні ЕРС, тобто, наприклад, у загальному випадку:

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0 \text{ або } \sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^n E_k$$

Наведемо приклади складання рівнянь за законами Кірхгофа для електричної схеми заміщення кола постійного струму, де перед тим як скласти рівняння, повинні бути вказані умовні позитивні напрямки струмів.

Для вузла *a* кола прийmemo позитивний напрямок до нього і тоді, за першим законом Кірхгофа, маємо:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

(струми, що спрямовані до вузла, приймають за позитивні, а струми, спрямовані від вузла, - за негативні).

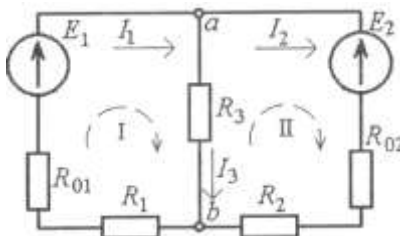


Рис. 3

Для контурів I і II кола довільно обираємо вказані напрямки обходу і за другим законом Кірхгофа маємо:

$$R_{01}I_1 + R_1I_1 + I_3R_3 = E_1; \quad R_{02}I_2 + R_2I_2 - I_3R_3 = -E_2$$

(позитивними записуються ЕРС E_k , які спрямовані за обходом контура, і спади напруги R_kI_k , коли напрямок струму I_k збігається із напрямком обходу, в інших випадках ставиться знак «-»).

2. Стандартні графічні позначення основних електротехнічних пристроїв

У загальному випадку, коли електричні величини є функціями часу, оперують з миттєвими потужностями:

для джерела ЕРС (рис. 4, а):

$$p_e = e i$$

для приймача (рис. 4, б):

$$p_z = u i$$

Енергія віддається до мережі, якщо в даний момент часу для джерела $p_e > 0$, а для приймача те ж саме, якщо $p_z < 0$. І навпаки - енергія забирається із мережі, якщо $p_e < 0$ або $p_z > 0$.

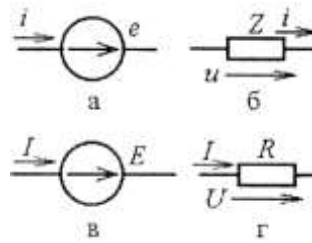


Рис. 4

У загальному випадку електрична енергія за інтервал часу T :

$$W = \int_0^T p dt, \text{ Дж.}$$

У колах постійного струму потужності є постійними:

$$P_E = EI; P_R = UI = RI^2;$$

(одиниця вимірювання - ватт [Вт]). Тоді в цих колах енергія визначається простіше, а саме: $W=PT$, або для ідеального резистивного елемента:

$$W = RI^2T$$

У колах змінного періодичного струму потужність прийнято оцінювати її середнім значенням за період зміни струму - ця величина називається активною потужністю, яка характеризує безповоротну витрату енергії:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt,$$

вона вимірюється в [Вт], T - період зміни струму.

У відповідності із законом збереження енергії у будь-якому електричному колі існує баланс потужностей: алгебраїчна сума потужностей джерел ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі потужностей приймачів (причому до приймачів відносять і внутрішні опори реальних джерел електроенергії - фактично розділяють активні і пасивні елементи схеми заміщення електричного кола).

У загальному випадку розглядається баланс миттєвих потужностей:

$$\sum_{k=1}^n p_{ek} = \sum_{k=1}^m p_{zk} \quad \text{або} \quad \sum_{k=1}^n e_k i_k = \sum_{k=1}^m u_k i_k,$$

де n, m - кількості ЕРС джерел і приймачів у даному колі (добутки $e_k i_k$ на активних елементах записуються позитивними, якщо напрямки e_k і i_k збігаються, та негативними, якщо їхні напрямки протилежні, добутки $u_k i_k$ йдуть зі знаком «плюс», тому що на пасивних елементах напрямки u_k і i_k співпадають).

Для кіл постійного струму баланс складається за постійними потужностями. Наприклад, для кола маємо:

$$E_1 I_1 - E_2 I_2 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_{01} I_1^2 + R_{02} I_2^2.$$

3. Послідовне, паралельне і мішане з'єднання споживачів, еквівалентний опір розгалуженого кола

В електричних колах змінного періодичного струму розрахунки і вимірювання прийнято виконувати в діючих значеннях електричних величин (вони позначаються як і постійні величини I, U, E , хоча тепер будуть мати інший зміст).

Діюче значення вводиться на прикладі струму наступним чином. У резисторі при проходженні змінного струму миттєва потужність і теплова енергія, що витрачається, визначаються так:

$$p = ui = Ri^2; \quad W_{T-} = \int_0^T p dt = \int_0^T Ri^2 dt.$$

Те ж саме, але при проходженні постійного струму постійна потужність і теплова енергія, що витрачається, мають вирази:

$$P = RI^2; W_{\text{т.}} = PT = RI^2T.$$

Діючим значенням змінного періодичного струму називається таке умовне значення постійного струму, який у тому ж самому об'єкті створить такий же тепловий ефект, як і змінний струм за один і той же час, який дорівнює періоду його (змінного струму) повторення T .

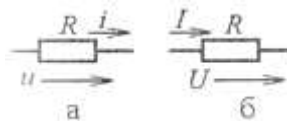


Рис. 5

Тобто, зрівнюючи W_T і $W_{\text{т.}}$, маємо:

$$RI^2T = \int_0^T i^2 R dt \quad \text{або} \quad RI^2T = R \int_0^T i^2 dt.$$

Звідси й отримуємо загальний вираз для діючого значення струму:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

Математично - це середньоквадратичне значення струму за його період.

Для ЕРС і напруги формули аналогічні:

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}; \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}.$$

4. Закон Ома для ділянки кола. Закон Ома для повного кола.

Електричні кола постійного струму в чистому вигляді зустрічаються досить рідко. Проте на їхньому прикладі прийнято вивчати структурні поняття і методи розрахунку електричних кіл узагалі, тому що супутні цьому розрахунку вирази й обчислювальні процедури є значно простішими, ніж, наприклад, для електричних кіл синусоїдного струму. І для цього досить математичної підготовки на базі середньої школи.

Розрахунки електричних кіл проводять із використанням електричних схем заміщення. Розрахувати електричне коло - це означає, що за заданими параметрами споживачів і ЕРС джерел визначити струми у вітках: така задача називається прямою. Якщо за заданим струмом у якій-небудь вітці і за параметрами споживачів належить визначити ЕРС джерел, то це зворотна задача.

На початку розрахунку належить вказати напрямки струмів у вітках кола, орієнтуючись на вказані напрямки напруги або ЕРС джерела (чи джерел). Співвідношення позитивних напрямків величин у простішому електричному колі показано. Позитивний напрямок ЕРС джерела E вибирається від мінусового Затискача до плюсового. Позитивний напрямок напруги U_E на ідеальному джерелі ЕРС протилежний його напрямку E . Позитивний напрямок струму I у джерелі електричної енергії збігається із напрямком ЕРС. А у зовнішньому стосовно джерела колі струм спрямований від позитивного до негативного полюса. Аналогічно, тобто від більшого потенціалу до меншого, спрямовуються напруги.

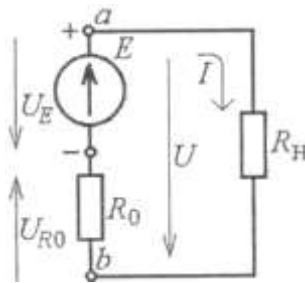


Рис. 6

Якщо з яких-небудь причин у складному електричному колі передбачити напрямок якогось струму не вдається, то напрямок можна взяти довільно. Остаточний напрямок струму визначається його знаком, отриманий ним після розрахунку (при негативному значенні його напрямок протилежний раніше вибраному). Позитивний напрямок напруги на активних і пасивних споживачах збігається із напрямком струму. Вказані спади напруги на внутрішньому опорі реального джерела електроенергії - U_{R0} , а також на пасивному споживачі електроенергії R_H - U , причому останній одночасно є напругою на затискачах аб реального джерела.

Співвідношення струмів, напруг і ЕРС в електричних колах визначається законом Ома і двома законами Кірхгофа.

На основі цих законів створено цілий ряд конкретних методів розрахунку електричних кіл. Доцільність застосування того чи іншого методу залежить від конкретного типу задачі, що розв'язується, та виду електричного кола, яке розглядається. Тут обмежимося поданням найбільш розповсюджених на практиці методів розрахунку електричних кіл, коротко описуючи їхню суть, а основний зміст розкриємо на конкретних прикладах.

Конкретний аналіз почнемо з розгляду простішого варіанта електричного кола постійного струму, що відповідає. Тут одне джерело електроенергії живить один її приймач. Поряд із поданням основних розрахункових співвідношень, на основі такого досить простого варіанта розглянемо поняття режимів роботи джерела електроенергії і його характеристики. Ці поняття в багатьох випадках зберігають свій зміст і для інших джерел електроенергії.

5. Робота і потужність постійного струму. Закон Джоуля-Ленца. Закони Кірхгофа

В електричній схемі заміщення реальне джерело зображене двома ідеальними елементами: джерелом постійної ЕРС E і внутрішнім опором R_0 . Резистивний елемент зі змінним опором R_H зображує регульовальне навантаження.

Основні розрахункові співвідношення в системі «джерело-споживач», яка утворює одноконтурне електричне коло:

- струм з урахуванням послідовного з'єднання R_0 і R_H та на основі закону Ома:

$$U = E - R_0 I,$$

де $R_0 I$ - спад напруги всередині джерела;

та ж напруга, але з позиції приймача:

$$U = R_H I,$$

- потужність, яка виробляється джерелом:

- потужність, яка віддається навантаженню:

- втрати потужності всередині джерела:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = R_0 I^2,$$

- коефіцієнт корисної дії (ККД) джерела:

Характеристики і режими роботи лінійного джерела електроенергії постійного струму

При змінному навантаженні роботу джерела оцінюють за допомогою його характеристик. Під характеристиками роботи джерела розуміють деякі функції, що пов'язують величини, супутні його роботі. Звичайно прийнято брати як аргумент струм I і розглядати функції - характеристики $U(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\eta(I)$. Зауважимо, що залежність $U(I)$ має власну назву: зовнішня характеристика джерела. Якщо вона прямолінійна, то джерело називається лінійним, відповідно, у схемі заміщення значення E і R_0 є постійними. Характеристики джерела електроенергії отримують, змінюючи величину опору навантаження R_H від ∞ до 0.

Для виявлення вигляду цих функцій спочатку розглянемо конкретний числовий приклад, а потім отримаємо типові вирази і графіки цих функцій у відносних одиницях (в.о.).

Таблиця 1

R_H, OM	∞	100	40	20	10	4	0
I, A	0	2	4	6	8	10	12
$U, \text{В}$	240	200	160	120	80	40	0
$P_1, \text{Вт}$	0	480	960	1440	1920	2400	2880
$P_2, \text{Вт}$	0	400	640	720	640	400	0
η	-	0,833	0,667	0,5	0,333	0,167	0

Розраховуючи характеристики джерела за схемою, задамо його ЕРС $E=240 \text{ В}$ і внутрішній опір $R_0=20 \text{ Ом}$. Задаючи також ряд значень опору навантаження R_H , проводимо розрахунки I , U , P_1 , P_2 і η за формулами. Результати розрахунків зведемо до табл. 1 і за цими даними побудуємо відповідні графіки, які і є згаданими вище характеристиками джерела $U(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\eta(I)$.

Із безлічі точок на характеристиках виділяють кілька особливих точок за віссю струму I і у відповідності з цим для джерела встановлені наступні його режими роботи:

1. Холостий хід, або неробочий режим (ХХ) - режим, при якому навантаження вимкнене, тобто $R_H=\infty$, і тоді $I=0$; и $U_{xx}=E$; $P_1=0$; $P_2=0$; η наближається до 1, але за суттю є невизначеною величиною, хоча реально вважається, що ККД дорівнює нулю.

2. Коротке замикання (КЗ) - затискачі джерела замкнуті накоротко, тобто $R_H=0$, і тоді $U=0$; $I_k = \frac{E}{R_0}$ (струм КЗ); $P_{1\max} = \frac{E^2}{R_0}$; $P_2 = 0$; $\eta = 0$ (струм I і потужність P_1 , що виробляється, тут є максимальними).

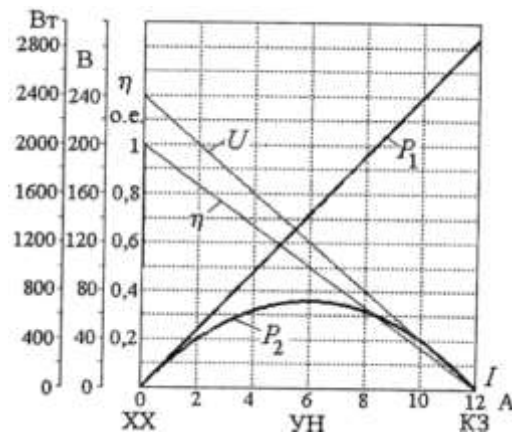


Рис. 7

3. Режим узгодженого навантаження (УН) - у цьому режимі належить встановити такий опір R_H , щоб від даного джерела отримати максимально можливу потужність P_2 .

Використовуючи вираз для визначення екстремуму, беремо похідну $\frac{dP_2}{dR_H} = 0$ і, розв'язуючи одержане рівняння, маємо умову узгодженого навантаження $R_H = R_0$. При цьому отримуємо такі співвідношення величин $I_y = \frac{E}{2R_0} = \frac{I_k}{2}$; $U_y = \frac{E}{2}$; $\frac{P_1}{P_{1\max}} = 0,5$;

$$\frac{P_2}{P_{1\max}} = 0,25; \eta = 0,5.$$

4. Номінальний режим (НР - або «ном») - це режим найбільш ефективної роботи, що характеризується номінальними значеннями напруги $U_{\text{НОМ}}$ і струму $I_{\text{НОМ}}$, які встановлює розробник і виготівник конкретного джерела електроенергії.

На осі струму вказані точки ХХ, УН і КЗ, які належать відповідним режимам. Точка НР не має фіксованої позиції і, в принципі, може знаходитися в будь-якому місці, в залежності від конкретних вимог до джерела. Однак найбільш типовим є положення точки НР між ХХ і УН, причому ближче до ХХ. При цьому виходять із потреби поєднання достатньо високих значень напруги і ККД. Якщо ж від даного джерела треба передати в навантаження максимально можливу потужність, то точка НР буде збігатися з точкою УН. При необхідності отримання граничних значень струму точка НР знаходитиметься біля точки КЗ.

У відповідності з вибраним номінальним режимом і встановлюють конкретні значення $U_{\text{НОМ}}$ і $I_{\text{НОМ}}$. За величиною $U_{\text{НОМ}}$ визначається і необхідна структура електроізоляції джерела і ступінь його електроні небезпеки; за величиною $I_{\text{НОМ}}$ визначається припустимий рівень нагріву джерела його внутрішніми тепловиділеннями ΔP . Рівень нагріву також впливає на вибір типу електроізоляції й умов охолодження джерела. Слід зауважити, що величину $U_{\text{НОМ}}$, як правило, беруть рівною або E , а не тему значенню U , що відповідає $I_{\text{НОМ}}$.

Графіки, що подані, характеризують роботу конкретного джерела. Щоб отримати узагальнені характеристики для будь-якого джерела, виразимо розглянуті величини у відносних одиницях, прийнявши за базу для струму I струм КЗ $I_k = \frac{E}{R_0}$; для напруги U -

ЕРС E ; для потужностей P_1 і P_2 - максимальне значення потужності джерела $P_{1\max} = \frac{E^2}{R_0}$. З

урахуванням цього отримуємо з безрозмірну форму характеристик джерела таким чином:

$$U^* = \frac{U}{E} = 1 - \frac{R_0}{E} I = 1 - \frac{I}{I_k} = 1 - I^*;$$

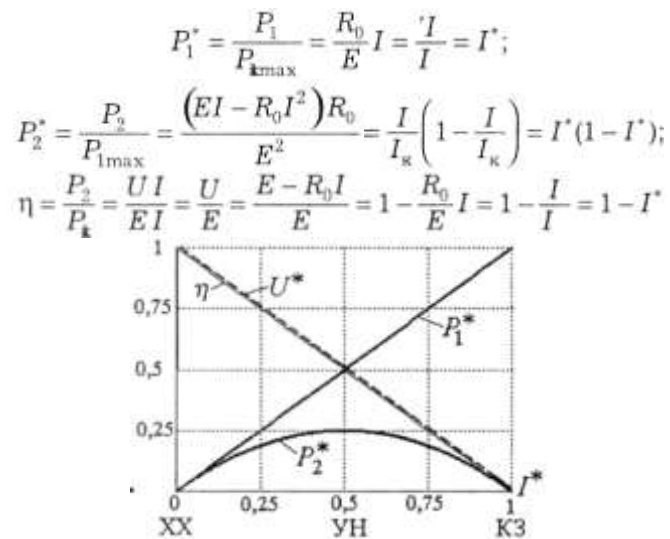


Рис. 8

У виразах всіх функцій використовується відносне значення струму $I^* = \frac{I}{I_k}$. З урахуванням цього на побудовані в безрозмірній формі типові графіки чотирьох характеристик джерела електроенергії.

6. Енергетичний баланс в електричному колі. Методи розрахунку електричних кіл за допомогою безпосереднього застосування законів Кірхгофа

Процеси в магнітних колах і значення магнітних величин суттєво залежать від магнітних властивостей середовища, які, як вже відзначено, характеризуються абсолютною μ або відносною μ_r магнітними проникностями. У залежності від значення μ_r , матеріали підрозділяють на два основних види: неферомагнітні і феромагнітні.

Якщо $\mu_r \approx 1$, то матеріали називають неферомагнітними, або немагнітними; зокрема, якщо μ_r трохи перевищує одиницю, то це парамагнетики; якщо трохи менше одиниці - діамагнетики. До немагнітних матеріалів відносять, наприклад, повітря, різні електроізоляційні матеріали (слюда, скло, папір, пластмаса та ін.), такі розповсюджені провідникові матеріали, як мідь і алюміній, нержавіючі сталі та безліч інших.

Якщо $\mu_r \gg 1$, тобто значно перевищує одиницю, досягаючи значень у діапазоні 100...10000, то це феромагнітні матеріали, або магнітні.

Серед хімічних елементів - феромагнітні перехідні елементи залізо (Fe), кобальт (Co) і нікель (Ni), а також рідкоземельні метали гадоліній (Gb), тербій (Tb), диспрозій (Dy) та інші (Ho, Er, Tm). Феромагнітними є також численні металічні сплави і з'єднання згаданих вище металів між собою й іншими неферомагнітними елементами, сплави і з'єднання хрому (Cr) і марганцю (Mn) з неферомагнітними елементами (Fe₃Al, Ni₃Mn, FePd₃, MnPt₃). Спеціально для використання як магнітопроводів різних пристроїв розроблено широкий сортамент електротехнічних сталей - група легованих кремнієм сталей (Fe + Si від 0,5 до 4 %).

Марки електротехнічних сталей позначаються кодом із чотирьох цифр і розшифровуються так: перша цифра - вид прокатки, структурний стан (1 - гарячекатана ізотропна, 2 - холоднокатана ізотропна, 3 - холоднокатана анізотропна); друга цифра - вміст кремнію (0 - до 0,4%, 1 - 0,4...0,8%, 2 - 0,8...1,8%, 3 - 1,8...2,8%, 4 - 2,8...3,8%, 5 - 3,8...4,8%); третя цифра - група за основною характеристикою, яка нормується (поєднанням магнітної індукції, її частоти і питомих магнітних втрат); четверта цифра - порядковий номер типу сталі. Так, наприклад, у трансформаторах застосовують сталі

1511...1514, 3411...3415; в електричних машинах 1211, 1212, 1311, 1411, 2411, 2412, 3411, 3413 та ін.

У цілому феромагнетики прийнято ділити на дві групи:

- магнітом'які матеріали, що використовуються, в основному, як провідники магнітного потоку;
- магнітотверді, що використовуються як джерело магнітного поля (постійні магніти).

У феромагнетиків величина μ_r залежить від величин магнітного поля B і H , тобто вона непостійна. Тому для таких матеріалів замість формули використовуються експериментально отримані залежності $B(H)$. Залежність $B(H)$ утворює сімейство петель гістерезису, приклад яких поданий для електротехнічної сталі марки 1212 при товщині листа 0,5 мм. Площі окремих петель гістерезису залежать від супутніх їм максимальних значень B_r і H_r , а також частоти перемагнічування f (відповідає $f=50$ Гц).

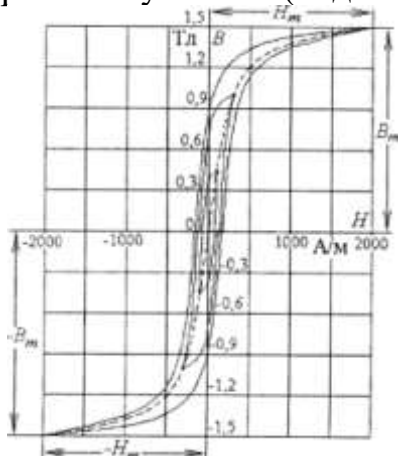


Рис. 9

За відсутності зовнішнього магнітного поля феромагнітний зразок розбитий на домени – області однорідної самодовільної намагніченості. У простішому випадку доменна структура являє собою шари, що чергуються, із взаємно протилежним напрямком намагніченості. Криві намагнічування і петлі гістерезису в феромагнетиках визначаються зміною об'єму доменів з різною орієнтацією намагніченості в них за рахунок зміщення меж доменів, а також повороту осей намагніченості доменів.

Процес перемагнічування пов'язаний із поглинанням енергії зовнішнього магнітного поля; площа всередині петлі магнітного гістерезису є мірою енергії, що перетворюється на теплоту при перемагнічуванні. Такі втрати енергії називаються гістерезисними.

На петлях гістерезису виділяються характерні точки: H_c - коерцитивна сила; B_r – залишкова індукція.

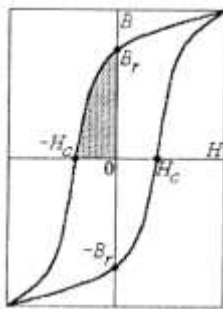


Рис. 10

Досить вузькі петлі гістерезису відповідають магнітом'яким матеріалам. У магнітотвердих матеріалів петлі гістерезису більш широкі, як показано на рис. 8.9. Так, наприклад, у чистого заліза H_c складає близько 80 А/м, у спеціального сплаву - магніко -

досягає 4640 А/м. Підвищення значень H_c і B_r добиваються для створення високоефективних постійних магнітів (створено матеріали з B_r близько 0,3...0,8 Тл). Для них у межах петлі гістерезису важливою є ділянка від B_r до $-H_c$ - розмагнічувальна частина, причому задача полягає в забезпеченні найбільшої величини площі заштрихованої частини петлі гістерезису

Магнітотверді матеріали для постійних магнітів утворюються з вуглецевих сталей із змістом вуглецю до 1% і з додаванням легуючих елементів (алюміній, нікель, вольфрам, хром, кобальт, молібден). Наприклад, сплав ЮНД (Fe+Ni+Al), сплав ЮНДК (Fe+Ni+Al+Co).

Наведені значення B_r відповідають феромагнетикам, що знаходяться у складі замкнених осердь, як, наприклад. За наявності у постійного магніту повітряного проміжку його залишкова індукція B_d значно менше залишкової індукції матеріалу B_r .

Якщо в процесі вимірювань зовнішнє магнітне поле змінюється за величиною і напрямком повільно, то отримується статична петля гістерезису. Якщо ж час встановлення напруженості поля порівняний із часом перемагнічування матеріалу, то залежності $B(H)$ є динамічними петлями гістерезису. Динамічні петлі гістерезису більш широкі й округлі, їхня площа збільшується з підвищенням частоти перемагнічування.

Багатозначні залежності $B(H)$ дуже складні, тому при практичних розрахунках ідуть на спрощення і користуються основною кривою намагнічування. Це та лінія, яка показана пунктиром і проходить по вершинах петель гістерезису. Основні криві намагнічування наводяться в довідковій літературі в табличній або графічній формах для всіх феромагнітних матеріалів, які використовуються практично. На рис. 8.10 наведені основні криві намагнічування для вказаних там же матеріалів.

Помітний перегин основних кривих намагнічування для магнітних сталей виникає при значеннях магнітної індукції $B_s = (1,2...1,7)$ Тл, що називається індукцією насичення. Подальше збільшення магнітної індукції потребує суттєвого підвищення напруженості магнітного поля, а фактично - магніторушійної сили обмотки, яка збуджує це поле, що впливає із. Тому такий рівень магнітних полів (1,2...1,7) Тл вважається загальноприйнятим для більшості електротехнічних пристроїв з феромагнітним магнітопроводом.

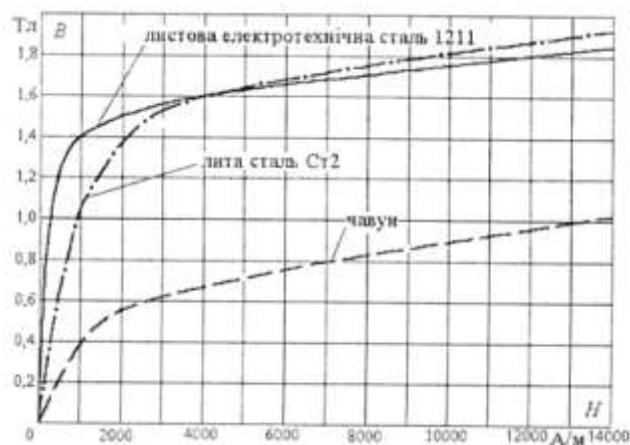


Рис. 11

Тема 2. Електромагнетизм і магнітні кола

План

1. Магнітне поле і його характеристики.
2. Закони електромагнітного поля.
3. Магнітні кола електричних машин, трансформаторів та електричних апаратів

1. Магнітне поле і його характеристики

Принцип дії багатьох електротехнічних пристроїв, таких як трансформатори, електричні апарати і машини, електровимірювальні прилади тощо побудовано на взаємодії електричних струмів і магнітних полів, або на взаємодії різних магнітних полів. Наприклад, перетворення механічної енергії в електричну та навпаки в таких пристроях відбувається за допомогою магнітного поля, що відображено в законах електромагнітної індукції й Ампера.

Для електротехнічних пристроїв типовим є наявність двох складових частин:

1) електричне коло утворене провідниками, які проводять електричний струм; при цьому провідники, як правило, згруповані в багатовиткові електричні котушки, а за наявності сукупності з'єднаних одна з одною котушок їх у цілому називають обмоткою;

2) магнітне коло - одне або сукупність феромагнітних осердь, які називаються магнітопроводом і слугують для проведення магнітного поля, його підсилення і концентрації у визначених робочих зонах пристроїв.

Як відомо, стан електричних кіл і процеси в них описуються за допомогою електричних величин: струму, ЕРС, напруги. Для магнітних полів і, отже, магнітних кіл використовують відповідні їм магнітні величини. Розглянемо ці величини й основні поняття щодо магнітного поля.

Магнітне поле може створюватися двома основними способами:

а) збудження постійними магнітами (рис. 1);

б) електромагнітне збудження, тобто за допомогою провідників, по яких тече струм I (див. рис. 2, а - одиночний провідник 2 б - багатовиткова котушка; - котушка з феромагнітним осердям).

У наочній формі магнітне поле прийнято зображати силовими лініями.

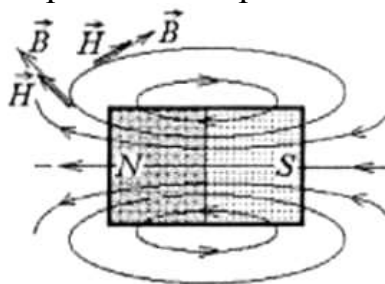


Рис. 1

Вони не мають початку і кінця, тобто завжди замкнені самі на себе. Силовим лініям приписується просторовий напрямок, який вказано стрілками на них. Стосовно постійного магніту в зовнішньому просторі лінії спрямовані від північного полюса N до південного S.

При електромагнітному збудженні силові лінії обов'язково зчеплені зі струмом (охоплюють провідники, по яким тече струм), а напрямок визначається за відомим правилом правокового буравчика (він вгвинчується за напрямком струму I і тоді напрямок обертання рукоятки збігається з напрямком силових ліній). Показані відповідні напрямки силових ліній.

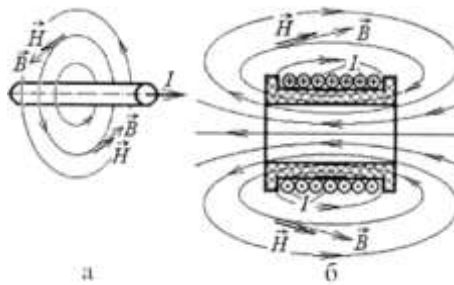


Рис. 2

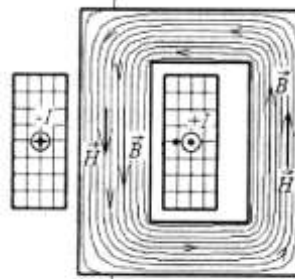


Рис. 3

Магнітне поле в кожній точці простору характеризується наступними величинами:

B - магнітна індукція [Тл], її вектор у просторі орієнтований по дотичній до силової лінії;

H - напруженість магнітного поля [А/м] - її вектор орієнтований так само, як і вектор індукції

Поміж індукцією і напруженістю магнітного поля встановлено взаємозв'язок:

$$B = \mu_0 \mu_r H,$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна стала (магнітна проникність вакууму);

μ_r - відносна магнітна проникність, яка показує, наскільки магнітні властивості даного середовища відрізняються від магнітних властивостей вакууму; добуток $\mu = \mu_0 \mu_r$ називається абсолютною магнітною проникністю (можливо її позначення і через μ_a).

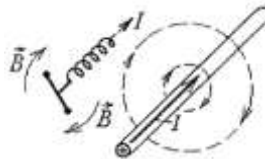


Рис. 4

Інтегральною величиною магнітного поля є магнітний потік Φ [Вб]. У загальному випадку, якщо в межах деякої поверхні S магнітне поле неоднорідне, тобто магнітна індукція змінюється за значенням і напрямком, тоді магнітний потік:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B dS \cos \alpha = \int_S B_n dS,$$

де dS - елемент поверхні, вектор якого спрямований за нормаллю n до неї; α - кут між B і dS (змінна величина); B_n - нормальна складова індукції (проекція вектора B на dS).



Рис. 5

У найбільш простому випадку - при однорідному магнітному полі, коли магнітна індукція B однакова і спрямована за нормаллю в межах площі S усієї поверхні, магнітний потік буде найбільшим і визначається із достатньо легко:

$$\Phi = BS$$

Поряд із величинами, що характеризують магнітне поле, використовується ще поняття магніторушійної сили (МРС) котушки. Вона характеризує здатність котушки утворювати магнітне поле і визначається добутком її струму I на кількість витків w :

$$F = wI,$$

одиниця вимірювання $[A]$ (іноді кажуть - ампервитки).

Зв'язок між електричними і магнітними величинами встановлюється законом повного струму:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum I$$

тобто циркуляція вектора напруженості H магнітного поля по замкненому контуру l чисельно дорівнює алгебраїчній сумі струмів, що охоплюються цим контуром ($d\vec{l}$ - векторний елемент довжини контуру).

Для прикладу розглянемо найпростіше магнітне коло, показане, де на осердя, яке має вигляд тору, намотана котушка. У даному випадку повний струм $\sum I = wI = F$.

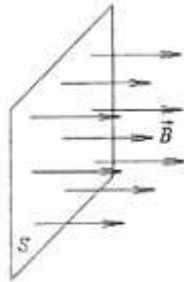


Рис. 6

З огляду на симетрію лінії (показані пунктиром) є круговими, містяться всередині котушки і на конкретній силовій лінії в усіх точках напруженість магнітного поля H постійна, а її вектор спрямований за дотичною до цієї лінії.

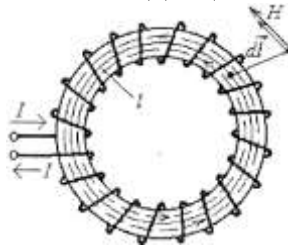


Рис. 7

За контур інтегрування l у формулі використаємо середню силову лінію. Тоді в кожній точці на цій лінії вектори H і $d\vec{l}$ паралельні один одному, як показано на рис. 7 в одній із точок (точку винесено). Тоді можна в добуток векторів замінити добутком скалярів і спростити вираз до:

$$\oint_l H dl = F$$

де постійна величина H виноситься за інтеграл й отримуємо:

$$HI = F \text{ або } HI = wI,$$

що встановлює зв'язок між струмом і напруженістю магнітного поля:

$$H = \frac{wl}{l} \text{ або } I = \frac{Hl}{w}$$

і на основі цього можна зв'язати й інші електричні і магнітні величини.

Добуток Hl в називається магнітною напругою і вимірюється в [А], а в загальному випадку магнітна напруга уздовж відрізка лінії довжиною l (або спад магнітної напруги) визначається виразом:

$$U_M = \int_l \vec{H} d\vec{l}$$

2. Закони електромагнітного поля.

Процеси в магнітних колах і значення магнітних величин суттєво залежать від магнітних властивостей середовища, які, як вже відзначено, характеризуються абсолютною μ або відносною μ_r магнітними проникностями. У залежності від значення μ_r , матеріали підрозділяють на два основних види: неферомагнітні і феромагнітні.

Якщо $\mu_r \approx 1$, то матеріали називають неферомагнітними, або немагнітними; зокрема, якщо μ_r трохи перевищує одиницю, то це парамагнетики; якщо трохи менше одиниці - діамгнетики. До немагнітних матеріалів відносять, наприклад, повітря, різні електроізоляційні матеріали (слюда, скло, папір, пластмаса та ін.), такі розповсюджені провідникові матеріали, як мідь і алюміній, нержавіючі сталі та безліч інших.

Якщо $\mu_r \gg 1$, тобто значно перевищує одиницю, досягаючи значень у діапазоні 100...10000, то це феромагнітні матеріали, або магнітні.

Серед хімічних елементів - феромагнітні перехідні елементи залізо (Fe), кобальт (Co) і нікель (Ni), а також рідкоземельні метали гадоліній (Gd), тербій (Tb), диспрозій (Dy) та інші (Ho, Er, Tm). Феромагнітними є також численні металічні сплави і з'єднання згаданих вище металів між собою й іншими неферомагнітними елементами, сплави і з'єднання хрому (Cr) і марганцю (Mn) з неферомагнітними елементами (Fe_3Al , Ni_3Mn , $FePd_3$, $MnPt_3$). Спеціально для використання як магнітопроводів різних пристроїв розроблено широкий сортамент електротехнічних сталей - група легованих кремнієм сталей (Fe + Si від 0,5 до 4 %).

Марки електротехнічних сталей позначаються кодом із чотирьох цифр і розшифровуються так: перша цифра - вид прокатки, структурний стан (1 - гарячекатана ізотропна, 2 - холоднокатана ізотропна, 3 - холоднокатана анізотропна); друга цифра - вміст кремнію (0 - до 0,4%, 1 - 0,4...0,8%, 2 - 0,8...1,8%, 3 - 1,8...2,8%, 4 - 2,8...3,8%, 5 - 3,8...4,8%); третя цифра - група за основною характеристикою, яка нормується (поєднанням магнітної індукції, її частоти і питомих магнітних втрат); четверта цифра - порядковий номер типу сталі. Так, наприклад, у трансформаторах застосовують сталі 1511...1514, 3411...3415; в електричних машинах 1211, 1212, 1311, 1411, 2411, 2412, 3411, 3413 та ін.

У цілому феромагнетики прийнято ділити на дві групи:

- магнітом'які матеріали, що використовуються, в основному, як провідники магнітного потоку;
- магнітотверді, що використовуються як джерело магнітного поля (постійні магніти).

У феромагнетиків величина μ_r залежить від величин магнітного поля B і H , тобто вона непостійна. Тому для таких матеріалів замість формули використовуються експериментально отримані залежності $B(H)$. Залежність $B(H)$ утворює сімейство петель гістерезису, приклад яких поданий на рис. 8 для електротехнічної сталі марки 1212 при товщині листа 0,5 мм. Площі окремих петель гістерезису залежать від супутніх їм максимальних значень B_T і H_T , а також частоти перемагнічування f (рис. 8 відповідає $f=50$ Гц).

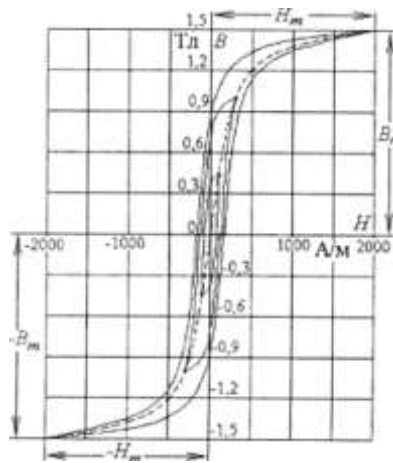


Рис. 8

За відсутності зовнішнього магнітного поля феромагнітний зразок розбитий на домени – області однорідної самодовільної намагніченості. У простішому випадку доменна структура являє собою шари, що чергуються, із взаємно протилежним напрямком намагніченості. Криві намагнічування і петлі гістерезису в феромагнетиках визначаються зміною об'єму доменів з різною орієнтацією намагніченості в них за рахунок зміщення меж доменів, а також повороту осей намагніченості доменів.

Процес перемагнічування пов'язаний із поглинанням енергії зовнішнього магнітного поля; площа всередині петлі магнітного гістерезису є мірою енергії, що перетворюється на теплоту при перемагнічуванні. Такі втрати енергії називаються гістерезисними.

На петлях гістерезису виділяються характерні точки : H_c - коерцитивна сила; B_r – залишкова індукція.

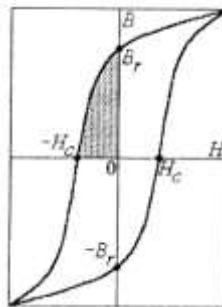


Рис. 9

Досить вузькі петлі гістерезису (як, наприклад, на рис. 8) відповідають магнітом'яким матеріалам. У магнітотвердих матеріалів петлі гістерезису більш широкі, як показано на рис. 9. Так, наприклад, у чистого заліза H_c складає близько 80 А/м, у спеціального сплаву - магніко - досягає 4640 А/м. Підвищення значень H_c і B_r добиваються для створення високоефективних постійних магнітів (створено матеріали з B_T близько 0,3...0,8 Тл). Для них у межах петлі гістерезису важливою є ділянка від B_r до $-H_c$ - розмагнічувальна частина, причому задача полягає в забезпеченні найбільшої величини площі заштрихованої частини петлі гістерезису (рис. 9).

Магнітотверді матеріали для постійних магнітів утворюються з вуглецевих сталей із змістом вуглецю до 1% і з додаванням легуючих елементів (алюміній, нікель, вольфрам, хром, кобальт, молібден). Наприклад, сплав ЮНД (Fe+Ni+Al), сплав ЮНДК (Fe+Ni+Al+Co).

Наведені значення B_T відповідають феромагнетикам, що знаходяться у складі замкнених осердь, як, наприклад, на рис. 7. За наявності у постійного магніту повітряного проміжку його залишкова індукція B_d значно менше залишкової індукції матеріалу B_r .

Якщо в процесі вимірювань зовнішнє магнітне поле змінюється за величиною і напрямком повільно, то отримується статична петля гістерезису. Якщо ж час встановлення напруженості поля порівняний із часом перемагнічування матеріалу, то залежності $B(H)$ є динамічними петлями гістерезису. Динамічні петлі гістерезису більш широкі й округлі, їхня площа збільшується з підвищенням частоти перемагнічування.

Багатозначні залежності $B(H)$ (рис. 8) дуже складні, тому при практичних розрахунках ідуть на спрощення і користуються основною кривою намагнічування. Це та лінія, яка показана на рис. пунктиром і проходить по вершинах петель гістерезису. Основні криві намагнічування наводяться в довідковій літературі в табличній або графічній формах для всіх феромагнітних матеріалів, які використовуються практично. На рис. 10 наведені основні криві намагнічування для вказаних там же матеріалів.

Помітний перегин основних кривих намагнічування для магнітних сталей виникає при значеннях магнітної індукції $B_s = (1,2 \dots 1,7)$ Тл, що називається індукцією насичення. Подальше збільшення магнітної індукції потребує суттєвого підвищення напруженості магнітного поля, а фактично - магніторушійної сили обмотки, яка збуджує це поле, що впливає. Тому такий рівень магнітних полів $(1,2 \dots 1,7)$ Тл вважається загальноприйнятим для більшості електротехнічних пристроїв з феромагнітним магнітопроводом.

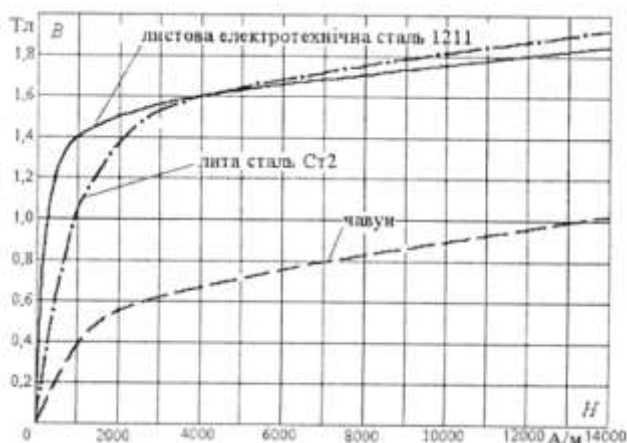


Рис. 10

Сукупність елементів, що збуджують і проводять магнітне поле, можна розглядати як магнітне коло, якщо контури замикання силових ліній поля очевидні і це поле сконцентроване в межах локальних областей простору, які явно виділяються. Для опису процесів у магнітних колах базовими величинами є магнітний потік Φ , магніторушійна сила (МРС) F (8.4) і магнітна напруга U_M .

Магнітне коло робить таким феромагнітний магнітопровід. Покажемо його роль на прикладі дроселя - котушки зі сталевим осердям.

За вихідний варіант візьмемо конструкцію із замкненим осердям прямокутної форми (див. рис. 3). Тут структура силових ліній досить суворо організована і цілком передбачена, що і є необхідною ознакою магнітного кола.

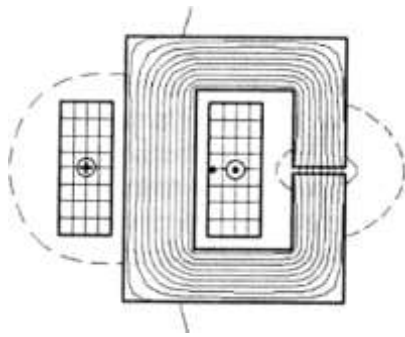


Рис. 11

Якщо ж у цьому осерді зробити невеликий проміжок, то виникає деяке розсіяння частини силових ліній в оточуючому просторі, що показано на рис. 11. Переважна частина магнітного поля все ще зосереджена в об'ємі осердя, тому цей варіант також можна розглядати як магнітне коло.

Якщо вилучити значну частину осердя (рис. 12), то в цьому місці структура магнітного поля становиться ще менш організованою і її передбачити вельми важко (картини полів на рис. 8.3, 8.11 і 8.12 та далі отримані досить складним спеціальним методом розрахунку). Для розрахунку такої структури вже недостатньо понять магнітного кола і відповідних величин Φ , F та U_M .

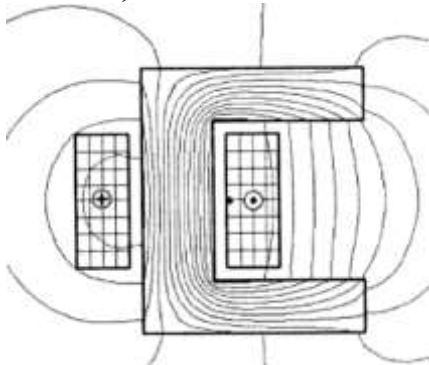


Рис. 12

Ще менше передбачувані структури магнітних полів (йдеться про точність, необхідну для розрахунку електротехнічних пристроїв) для варіантів за наявності осердя тільки всередині котушки (рис. 13) і за його повної відсутності (рис. 14).

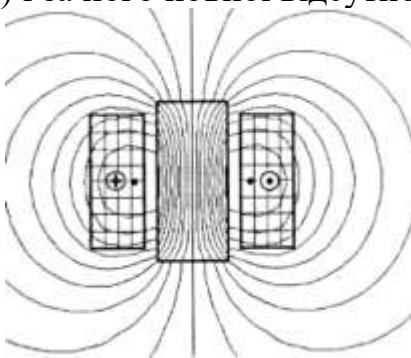


Рис. 13

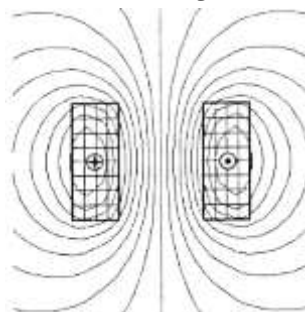


Рис. 14

Зауважимо, що на рисунках між парами сусідніх силових ліній проходить у будь-якому місці уздовж них один і той же магнітний потік, але, природно, для кожного рисунка він має своє значення. Тому в місцях розрідження силових ліній магнітна індукція буде меншою, ніж у місцях їхнього згущення у відповідній пропорції.

Таблиця 1

Варіант магнітного поля	Магнітна індукція, Тл	
	B_1	B_2
Рис. 3	1,659	1,931
Рис. 11	1,542	1,412
Рис. 12	0,429	,095
Рис. 13	0,202	0,031
Рис. 14	0,058	0,019

Тому за картинами силових ліній можна судити про розподіл магнітної індукції в кожному із розглянутих варіантів магнітних полів. Більш конкретне уявлення про ефективність феромагнітного магнітопроводу дають дані, подані в табл. 1.

Тут даються по два значення магнітної індукції в місцях, які у всіх випадках у просторі зафіксовані однаково, і ці місця вибрані за рис. 11: B_1 - середнє значення магнітної індукції в осерді всередині котушки на лінії, що перпендикулярна його осі і знаходиться на середньому рівні за висотою котушки; B_2 - середнє значення магнітної індукції в проміжку. Для певності вкажемо деякі параметри магнітного кола на рис. 11: МРС котушки дорівнює 3000 А, довжина середньої лінії осердя - 168 мм, проміжок - 1,5 мм. Конструктивні відмінності інших варіантів, що подані на рис. 3, 12-14, від рис. 11 очевидні, як очевидні і супутні зміни магнітного поля в табл. 1.

Таким чином, феромагнітні осердя посилюють магнітне поле, виконують роль його провідників і концентраторів, а у випадку постійних магнітів - і його джерел.

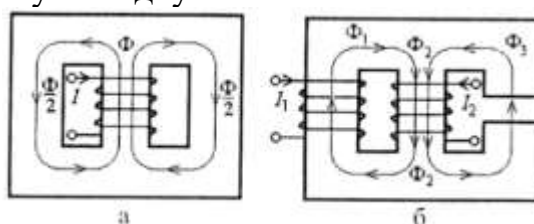


Рис. 15

У залежності від конфігурації осердь, магнітні кола ділять на наступні типи:

- нерозгалужені і розгалужені - перші мають один явно виражений контур замикання переважної частини магнітного потоку (приклади на рис. 3, 7 і 11); другі - два і більше таких контурів (приклад - на рис. 15, причому, а - симетричне, б - несиметричне магнітні кола);

- однорідні і неоднорідні - у перших на всій довжині силових ліній значення індукції і напруженості магнітного поля незмінні, тобто $B = \text{const}$ і $H = \text{const}$, а це можливо, якщо: 1) на цій довжині магнітопровід однорідний (із одного матеріалу); 2) має постійну площу поперечного перерізу $S = \text{const}$; 3) не має відгалужень магнітного потоку, тобто $\Phi = \text{const}$ (приклад однорідного магнітного кола на рис. 7); у неоднорідних магнітних кіл вказані умови (всі або хоча б одне) не витримуються (приклади на рис. 3 і рис. 11). У залежності від кількості обмоток, які збуджують магнітне поле, бувають одно- і багатообмоткові магнітні кола (приклади перших - на рис. 3, 7, 11, других - на рис. 15, б).

Осердя можуть виготовлятися наступних типів: а) масивними, тобто з суцільним заповненням об'єму, наприклад, лити, із товстого листа, у вигляді поковки; б)

шихтованими, тобто набраними зі сталевих листів або навитими зі сталевий стрічки, товщина яких може бути порядку 0,1...0,5 мм; в) пресованими із порошку феромагнітного матеріалу з яким-небудь зв'язуючим наповнювачем.

Масивні осердя застосовують при постійному магнітному потоці, інші - при змінному, причому шихтовані осердя - на низьких частотах (до тисяч Гц), пресовані - на більш високих частотах.

Зрозуміло, що різні варіанти ознак можуть бути властиві одному і тому ж магнітному колу. Так, наприклад, магнітне коло на рис. 7 - однорідне, нерозгалужене, однообмоткове; на рис. 15, б - неоднорідне, розгалужене, двообмоткове.

3. Магнітні кола електричних машин, трансформаторів та електричних апаратів

Силкові лінії магнітного поля і магнітні величини – це поняття, введені вченими-дослідниками, і вони є значною мірою абстрактними. Проте саме магнітне поле є матеріальною субстанцією і має цілком конкретні матеріально відчутні прояви, до основних із яких належать наступні.

1. Індукуюча дія магнітного поля полягає в тому, що змінне магнітне поле утворює ЕРС, що знайшло своє відображення в законі електромагнітної індукції.

а) для нерухомого контура або котушки, що пронизуються змінювальним магнітним потоком, ЕРС дорівнює швидкості зміни їхніх магнітних потокозчеплень ψ :

$$e = - \frac{d\psi}{dt}$$

де $\psi = \sum_{k=1}^{\omega} \Phi_k$, ω – кількість витків котушки; Φ_k - магнітний потік, який пронизує її k-ий виток.

Так на рис. 16 магнітне поле збуджується однією з котушок, яка живиться змінним струмом і від генератора G. У другій котушці змінне магнітне поле індукуює ЕРС e , яка створює напругу u на затискачах котушки. Ця напруга, а значить і ЕРС, може наочно вимірюватися, наприклад, мілівольтметром mV.

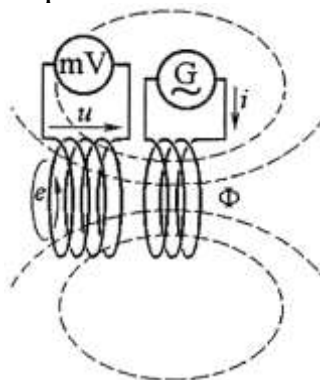


Рис. 16

б) для провідника, який переміщується в однорідному магнітному полі (рис. 17), ЕРС визначається формулою:

$$E = VB \sin \alpha,$$

де V , l - швидкість руху провідника і його довжина;

B - індукція магнітного поля.

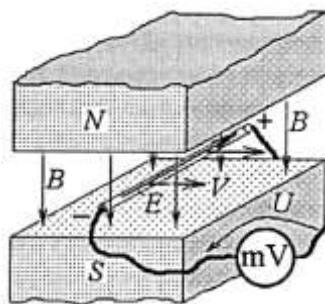


Рис. 8.17

ЕРС створює на кінцях провідника різницю потенціалів: + і -. Напруга U , що виникає, може також наочно вимірюватися мілівольтметром mV .

2. Силова дія магнітного поля полягає у виникненні механічних сил, що діють на провідники зі струмом, а також на феромагнітні осердя, а саме:

а) закон Ампера виражає силу, що діє на провідник довжиною l зі струмом I , який розміщений у магнітному полі з індукцією B :

$$F_A = IBlsin\alpha$$

(напрямок сили Ампера визначається за правилом лівої руки - рис. В.14).

Так на рис. 18 від генератора G постійний струм іде по провідниковій рамці, що знаходиться в магнітному полі постійного магніту або електромагніту. Сили F_A , які діють на боки рамки, створюють електромагнітний момент M_{EM} . Цей момент і, таким чином, сили можуть бути наочно визначені через обертальний момент опору M_c від вантажу P , який пов'язаний зі шківом на осі рамки, б) електромагнітна сила:

$$F_{EM} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S$$

діє на феромагнітні осердя, в проміжку між торцями яких є магнітне поле (рис. 19), де B_0 – магнітна індукція в проміжку; S - площа поверхні, зверненої до проміжку (сили F_{EM} спрямовані так, що стягують осердя).

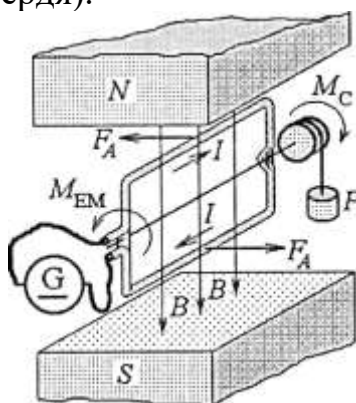


Рис. 18

в) механічні сили діють у магнітному полі на постійні магніти, як, наприклад, намагнічена стрілка (рис. 20): вона розташовується уздовж силових ліній (за напрямком векторів індукції B магнітного поля, що створюється іншим постійним магнітом), причому різнойменні полюси магнітів притягуються, однойменні - відштовхуються.

На закінчення зауважимо, що принцип дії електротехнічних пристроїв майже завжди оснований на використанні індукуючої або силової дії магнітного поля або обох водночас.

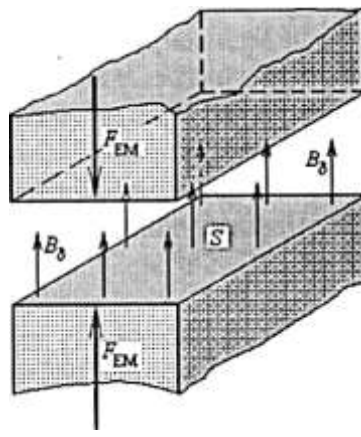


Рис. 18

11. Закони магнітних кіл

Досить точний розрахунок магнітних полів, зображених на рис. 11-14 і у разі більш складних електромагнітних систем, потребує застосування спеціальних польових методів розрахунку.

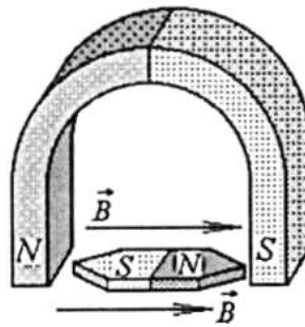


Рис. 20

Вони засновані на розв'язанні першого рівняння із системи рівнянь електромагнітного поля, сформульованої Максвеллом, а саме, рівняння:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}$$

де H , J - вектори напруженості магнітного поля і густини струму.

Для магнітних кіл, в яких просторова структура магнітного поля досить очевидна, використовуються простіші методи розрахунку, засновані на законах Ома і Кірхгофа. Такі закони для магнітних кіл ці вчені не формували. А назви законів запозичені з електричних кіл у зв'язку з формально близькою аналогією між названими законами для цих і магнітних кіл.

Закон Ома для магнітного кола.

Розглянемо однорідну ділянку якого-небудь магнітного кола (рис. 21). Це може бути частина феромагнітного осердя або навіть повітряний проміжок. Ознаки однорідної ділянки такі ж, як і однорідного магнітного кола.

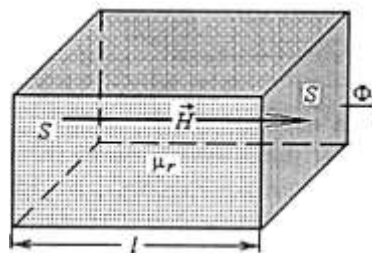


Рис. 21

А саме, щоб у магнітному колі виділити однорідну ділянку, на всій її довжині l напруженість магнітного поля H повинна бути постійною. З урахуванням відомих співвідношень маємо:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\Phi}{S \mu_0 \mu_r}$$

Звідси випливає, що для забезпечення $H = \text{const}$ однорідна ділянка магнітного кола повинна мати такі зовнішні ознаки:

- 1) відсутність в її межах відгалужень магнітного потоку ($\Phi = \text{const}$);
- 2) постійність площі поперечного перерізу ($S = \text{const}$);
- 3) однорідність матеріалу з магнітних властивостей ($\mu_r = \text{const}$).

Розглянемо спад магнітної напруги на довжині однорідної ділянки з урахуванням:

$$U_M = Hl = \frac{l\Phi}{S\mu_0\mu_r} = R_M\Phi$$

Тут окрема частина R_M називається магнітним опором:

$$R_M = \frac{l}{S\mu_0\mu_r}$$

З урахуванням цього формулюється закон Ома для однорідної ділянки магнітного кола: спад магнітної напруги дорівнює добутку магнітного опору і магнітного потоку:

$$U_M = R_M\Phi$$

Це формально схоже з законом Ома $U = RI$ для електричного кола, де також фігурують напруга U і опір R , але електричні, а магнітний потік формально можна уподібнити електричному струму I .

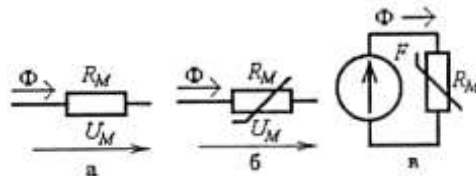


Рис. 8.22

Тепер однорідну ділянку магнітного кола (рис. 21) можна замінити лінійним магнітним опором (рис. 22, а), що відповідає неферомагнітним ділянкам, де $\mu_r \approx 1$, або нелінійним магнітним опором (рис. 22, б), що відповідає феромагнітним ділянкам, де $\mu_r = \text{var}$ (змінна величина, бо залежить від B і H).

Для однорідного магнітного кола (рис. 7) магнітопровід, природно, являє собою єдину однорідну ділянку. Тому, з урахуванням (7), можна замість (18) записати модифікацію закону Ома:

$$F = R_M\Phi$$

і використати схему заміщення такого кола у відповідності з рис. 22, в, де F - МРС котушки за (4).

Перший закон Кірхгофа для магнітного кола: алгебраїчна сума магнітних потоків, які сходяться в його розгалуженні, дорівнює нулю:

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

де m - кількість віток у розгалуженні магнітопроводу.

Так, на рис. 23, а зображено розгалуження магнітного кола, наприклад, як фрагмент рис. 15, б, а на рис. 23, б - його схематичне подання. З урахуванням позначень напрямків магнітних потоків:

$$\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

Цей закон Кірхгофа заснований на безперервності силових ліній, так що сумарний магнітний потік для замкненої поверхні завжди дорівнює нулю.

Другий закон Кірхгофа для магнітного кола. Цей закон виходить з закону повного струму і формулюється для неоднорідних магнітних кіл, приклади яких є на рис.

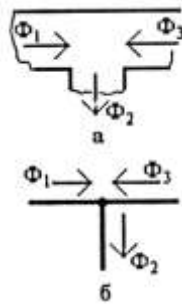


Рис. 23

У даному випадку для прикладу візьмемо неоднорідне магнітне коло, яке подано на рис. 24. Воно відповідає рис.11, тільки тепер приймаємо спрощену структуру магнітного поля, яка зображена кількома силовими лініями.

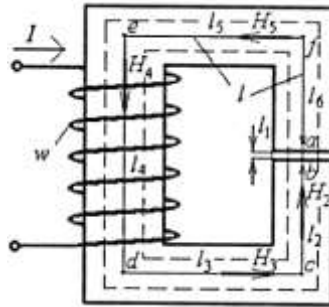


Рис. 24

Контур інтегрування I в необхідно брати таким, щоб він збігався із середньою силовою лінією, яка, у свою чергу, на рис. 24 збігається із середньою лінією осердя I . Тоді вектор напруженості магнітного поля H на всій довжині лінії I паралельний її елементам dl . Із урахуванням того, що $Hdl = Hdl\cos(Hdl) = Hdl\cos 0 = Hdl$, в Hdl спрощується до Hdl .

Магнітне коло по довжині контура I поділяємо на однорідні ділянки, кількість яких позначимо n . Ознаки, за якими ділянку можна вважати однорідною, подано при викладанні закону Ома. На рис. 24 показано розбиття лінії на шість однорідних ділянок: ab , be , cd , de , ef і fa з відповідними довжинами l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , l_5 і l_6 .

Через те, що по довжині контур інтегрування

$$l = \sum_{k=1}^n l_k$$

є розбитим тепер на відрізки, то й інтеграл поділяється на суму відповідних інтегралів:

$$\oint_l Hdl = \sum_{k=1}^n \int_{l_k} H_k dl = \sum_{k=1}^n H_k l_k$$

де враховано, що в межах довжини l_k к-тої однорідної ділянки $H_k = \text{const}$.

Сума струмів у виразі закону повного струму для рис. 24 дорівнює МРС струмової котушки, тобто, а в загальному випадку, коли контур зчеплений з m котушками - алгебраїчній сумі їхніх МРС. Коли напрямок струму котушки і напрямок обходу контура узгоджені з правилом буравчика (див. рис. 4), то МРС позитивна, якщо ні - негативна. Приклад контура з двома МРС є на рис. 15, б.

У результаті формулюємо другий закон Кірхгофа для магнітного кола: алгебраїчна сума спадів магнітних напруг на ділянках амкненого контура в магнітному колі дорівнює алгебраїчній сумі МРС котушок, зчеплених з цим контуром, тобто:

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^m F_k$$

У магнітна напруга на k -тій однорідній ділянці $U_{Mk} = H_k l_k = R_{Mk} \Phi$, що відповідає закону Ома.

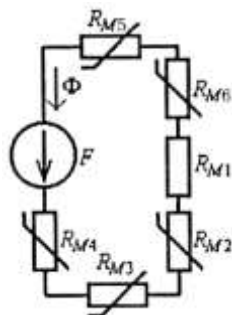


Рис. 25

Тепер нерозгалужене магнітне коло на рис. 24 може бути зображено магнітною схемою заміщення на рис. 25 - сукупністю послідовно з'єднаних магнітних опорів його ділянок, магнітний потік Φ у якому спричиняється МРС котушки F .

Тема 3. Електричне коло змінного струму

План

1. Вироблення синусоїдного струму і його характеристики. Сфери застосування та причини широкого розповсюдження електротехнічних пристроїв синусоїдного струму промислової частоти.
2. Основні параметри, які характеризують змінний струм: початкова фаза; зсув фаз; миттєве, амплітудне, середнє та діюче значення струму, е.р.с. та напруги. Зображення синусоїдних величин векторами.
3. Електротехнічні елементи у колах змінного струму: резистор, котушка індуктивності, конденсатор. Активний, реактивний і повний опір кола.
4. Миттєва, повна, активна та реактивна потужності змінного струму. Трикутник потужностей. Коефіцієнт потужності та його економічне значення.
5. Коло синусоїдного струму з послідовним та паралельним з'єднанням R, L, C.

1. Вироблення синусоїдного струму і його характеристики. Сфери застосування та причини широкого розповсюдження електротехнічних пристроїв синусоїдного струму промислової частоти.

Колами синусоїдного струму називаються такі електричні кола, в яких часові функції електричних величин, тобто електрорушійні сили (ЕРС), напруги та струми, змінюються за гармонічним - синусоїдним - законом. Знайомство з такими колами починається з однофазних кіл. В однофазному колі діє одне синусоїдне джерело ЕРС або воно живиться від двопровідного джерела синусоїдої напруги.

Основою кіл синусоїдного струму є генератори змінного струму, в яких виробляються синусоїдні ЕРС. Тому, перш ніж вивчати процеси в цих колах, розглянемо принцип отримання ЕРС, яка змінюється в часі за синусоїдним законом.

На рис. 1, а зображено простіший однофазний генератор, який виробляє синусоїдну ЕРС. Тут прямокутна провідникова рамка $abcd$ (виток) обертається з кутовою швидкістю Q між полюсами N і S постійного магніту, який збуджує магнітне поле. При цьому, згідно із законом електромагнітної індукції, у повздовжніх частинах рамки ab і cd індукуються ЕРС e_{ab} і e_{cd} , напрямки яких устанавлюються за правилом «правої руки».

Визначимо вказані ЕРС, використовуючи поперечний переріз моделі генератора. Тут зазначені лінійні швидкості переміщення боків рамки V , а також показані напрямки силових ліній магнітного поля i , відповідно, напрямком вектора магнітної індукції B . ЕРС у провіднику рамки ab складає:

$$e_{ab} = BVl \sin \alpha,$$

де l - довжина боку рамки; α - кут між векторами V і B .

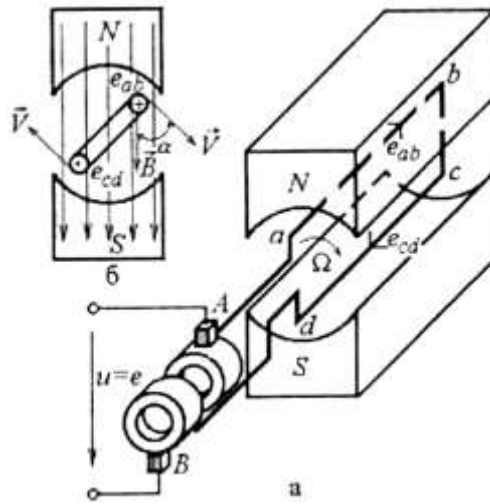


Рис. 1

Вважатимемо, що магнітне поле однорідне, тобто в зоні обертання рамки магнітна індукція скрізь однакова за величиною і напрямком. Тоді у формулі змінюється тільки кут α (через безперервну зміну напрямку вектора швидкості), який визначається так: $\alpha = \Omega t$.

У другому боці рамки ЕРС e_{cd} аналогічна, але має протилежний напрямок. Однак, якщо робити обхід за контуром рамки, то ЕРС її двох боків додаються, і на всю рамку отримуємо ЕРС:

$$e = e_{ab} + e_{cd} = 2e_{ab} = 2B\ell v \sin = 2B\ell v \sin \Omega t$$

У цій формулі позначимо $E_T = 2B\ell v$, і це є не що інше, як амплітуда ЕРС. Таким чином у контурі отримуємо синусоїдну ЕРС:

$$e = E_T \sin \Omega t.$$

Через контактні кільця, що обертаються разом із рамкою, і через нерухомі щітки А і В, що ковзають по поверхні контактних кілець, ЕРС передається на вихідні затискачі генератора, утворюючи на них відповідну синусоїдну напругу u , яка дорівнює e (див. рис. 1, а). Якщо до затискачів на щітках під'єднати будь-яке електричне навантаження, то в електричному колі, що утвориться, виникне синусоїдний струм.

Конструкція реальних генераторів значно складніша, і в них замість рамки використовують багатовиткову обмотку. Тоді амплітуда ЕРС зростає пропорційно кількості витків. Однак принцип дії таких генераторів відповідає тому, який розглядається на рис. 1.

2. Основні параметри, які характеризують змінний струм: початкова фаза; зсув фаз; миттєве, амплітудне, середнє та діюче значення струму, е.р.с. та напруги.

Зображення синусоїдних величин векторами.

При аналізі процесів у колах синусоїдного струму можливе використання різних форм зображення синусоїдних електричних величин. Наведемо ці форми для напруги, струму і ЕРС.

1. Аналітична форма

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u); \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad e = E_m \sin(\omega t + \psi_e),$$

де u, i, e - миттєві значення; U_T, I_T, E_T - амплітуди; ω - кутова частота [с^{-1}], яка замінила кутову швидкість Ω в, бо це не завжди одне й те ж:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f,$$

причому $1/T = f$ - частота [Гц], T - період повторення [с]; ψ_u, ψ_i, ψ_e - початкові фази. Наприклад, при $f=50$ Гц маємо $\omega=314 \text{ с}^{-1}$, $T=0,02 \text{ с}$.

При порівнянні напруги і струму за часом використовують різницю часових фаз, вводячи поняття фазовий зсув

$$\varphi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i), \text{ або } \varphi = \psi_u - \psi_i,$$

причому тут первісно напругу поставлено на перше місце, а струм - на друге, що зумовлює в подальшому знаки («+» або «-») у низці формул і в інших випадках.

Можливі такі комбінації і відповідна термінологія: $\psi_u \geq \psi_i$ напруга за фазою випереджає струм: $\varphi > 0$; $\psi_u = \psi_i$ - напруга і струм збігаються за фазою: $\varphi = 0$; $\psi_u < \psi_i$ - напруга відстає за фазою від струму: $\varphi < 0$.

2. Графічна форма. Синусоїди напруги u і струму i подані на рис. 2, причому рисунок відповідає значенням величин $\psi_u > 0$; $\psi_i < 0$; $\varphi > 0$. Замість часу і по осі абсцис прийнято відкладати ωt : так переходять від секунд до радіанів. Це зручно, тому що так легко встановити масштаб по цій осі (період синусоїд дорівнює 2π).

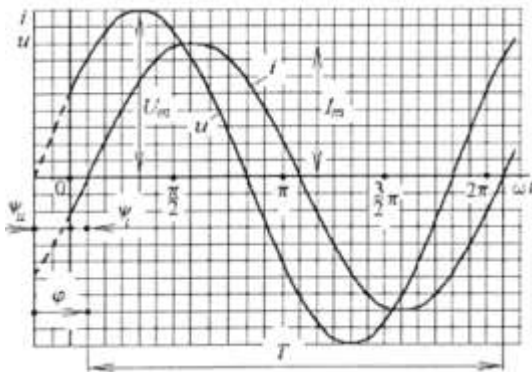


Рис. 2

3. Діюче значення. Вихідна формула і зміст діючого значення струму вже були подані раніше, а далі для конкретного виразу синусоїдного струму $i = I_m \sin \omega t$ проводимо необхідні перетворення:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{I_m^2}{2} T},$$

із цього вже отримаємо діюче значення синусоїдного струму:

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

Аналогічно для синусоїдних напруги і ЕРС отримуємо діючі значення за формулами:

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

Зазначимо, що в колах синусоїдного струму при вимірюваннях та розрахунках прийнято оперувати діючими значеннями електричних величин.

4. Середнє значення. За період T маємо середнє значення

$$I_{\text{сеп}} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = 0,$$

що характерно для будь-якої синусоїди.

На практиці прийнято брати середнє значення за півперіоду:

$$I_{\text{сеп}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m.$$

Аналогічно для напруги

$$U_{\text{сеп}} = \frac{2}{\pi} U_m \text{ і ЕРС } E_{\text{сеп}} = \frac{2}{\pi} E_m.$$

5. Векторне зображення. Із курсу математики відомо, що синусоїди можна зобразити векторами, що обертаються з кутовою швидкістю ω проти руху годинникової

стрілки, а їхні довжини дорівнюють амплітудам U_T , I_T у відповідних масштабах. Так, синусоїдні напруга і струм у вигляді обертових векторів. Якщо визначити проекцію вектора на вісь ординат, як це показано для напруги, то отримуємо безпосередньо синусоїду цієї електричної величини $U = U_T \sin(\omega t + \psi_u)$, що повторює.

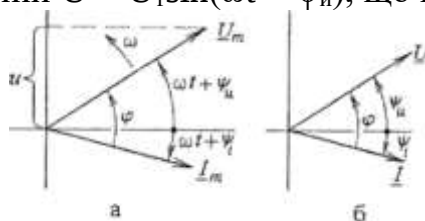


Рис. 3

На практиці прийнято зображати вектори для фіксованого моменту часу $t=0$, а довжини векторів брати в масштабі рівними діючому значенню відповідної електричної величини. Тоді вектори займають положення по відношенню до горизонтальної осі під кутами, що дорівнюють початковим фазам електричних величин. Кут зсуву фаз ϕ відкладають від вектора струму до вектора напруги, що належить далі завжди враховувати, визначаючи знак цього кута.

Прийнято, що позитивні кути відкладаються проти руху годинникової стрілки.

Сукупність векторів електричних величин, зображених у спільній координатній системі, називається векторною діаграмою. Векторні діаграми використовуються при виводі основних розрахункових співвідношень для кіл синусоїдного струму при розв'язанні задач, для перевірки результатів розв'язання тощо.

У відповідності з векторним зображенням синусоїд, закони Кірхгофа, для кіл синусоїдного струму набувають модифікації:

перший закон Кірхгофа:

$$\sum_{k=1}^m \underline{I}_k = 0;$$

другий закон Кірхгофа:

$$\sum_{k=1}^n \underline{U}_k = 0.$$

Тут додаються вектори діючих значень. Усі правила складання рівнянь і урахування знаків зберігаються, тільки тепер ідеться про геометричні суми векторів. Довжини векторів дорівнюють діючим значенням, тому їхні літерні позначення однакові. А щоб не плутати вектори та діючі значення, позначення перших підкреслюють.

Зображення за допомогою комплексних чисел. Вектори електричних величин розміщуються на площині комплексних чисел (рис. 4) з осями дійсних $(-1; +1)$ і уявних $(-j; +j)$ чисел, де $j=1$ - уявна одиниця (у математиці вона позначалася літерою i , але у даному разі це струм).

Ці величини, наприклад, напругу і струм, можна зобразити:

а) в алгебраїчній формі:

$$\underline{U} = U' + jU''; \quad \underline{I} = I' + jI''.$$

де U', I' - дійсні, U'', I'' - уявні складові комплексних величин у показовій формі:

$$\underline{U} = Ue^{j\psi_u}; \quad \underline{I} = Ie^{j\psi_i},$$

де U, I - модулі, що дорівнюють діючим значенням відповідних величин; ψ_u, ψ_i - аргументи, що дорівнюють початковим фазам; e - основа натуральних логарифмів (не плутати з ЕРС).

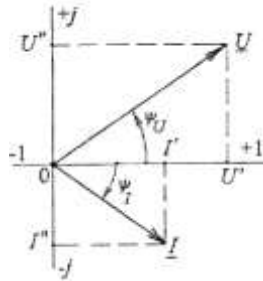


Рис. 4

Перехід із однієї форми в іншу виконується за відомими правилами, наприклад, для напруги:

$$\underline{U} = U e^{j\psi_u} = U \cos \psi_u + j U \sin \psi_u = U' + j U'',$$

$$\underline{U} = U' + j U'' = \sqrt{(U')^2 + (U'')^2} e^{j \arctg(U''/U')} = U e^{j\psi_u}.$$

Закони Кірхгофа при використанні комплексної форми величин отримують модифікацію, яка зовні збігається з виразами у разі використання векторного зображення синусоїдних електричних величин, однак тепер в формули і рівняння повинні підставлятися комплексні величини:

перший закон Кірхгофа:

$$\sum_{k=1}^m \underline{I}_k = 0;$$

другий закон Кірхгофа:

$$\sum_{k=1}^n \underline{U}_k = 0.$$

3. Електротехнічні елементи у колах змінного струму: резистор, котушка індуктивності, конденсатор. Активний, реактивний і повний опір кола.

Для розрахунку кіл синусоїдного струму основоположними є співвідношення напруги і струму на пасивних ідеальних елементах R, L і C. Причому, на відміну від кіл постійного струму, важливим є співвідношення напруги та струму не тільки за значенням, але і за часом, тобто фазовий зсув між ними.

Виведемо та проілюструємо ці співвідношення. Розглядаючи конкретний ідеальний елемент, будемо вважати заданим синусоїдний струм і параметр цього елемента (R або L, або C). А задача буде полягати у визначенні часової функції напруги, а потім і вказаних кількісних і часових співвідношень.

1. Ідеальний резистивний елемент R.

Задано, що по ділянці кола з цим елементом R проходить струм $i = I_T \sin(\omega t + \psi_i)$; належить визначити функцію напруги $u_R(t)$.

Використовуючи загальний вираз для змінних струму і напруги, маємо:

$$u_R = R i = R I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Звідси амплітуда напруги $U_T = R I_T$, що є законом Ома для амплітуд. А якщо врахувати, $I_T = 2I$, $U_T = 2U$, то отримуємо закон Ома для діючих значень напруги і струму на ідеальному резистивному елементі:

$$U_R = R I.$$

Кутова частота напруги со зберігається такою, як і у струму. Початкова фаза напруги у (3.18) збігається із початковою фазою струму: $\psi_u = \psi_i$; тоді за (3.6) фазовий зсув:

$$\varphi_R = 0$$

Показані синусоїди струму і напруги, в - їхнє векторне зображення. Очевидно, що якщо початкова фаза струму задана і побудована синусоїда струму або його вектор, то напруга збігається за фазою зі струмом.

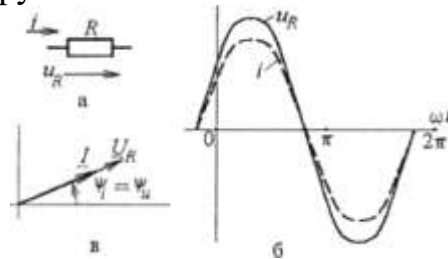


Рис. 5

2. Ідеальний індуктивний елемент L

Діємо як в попередньому пункті: задано струм $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$; належить визначити функцію напруги $u_L(t)$.

Виходячи із загального співвідношення визначаємо шукану функцію:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \omega L I_m \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right),$$

звідки очевидно співвідношення амплітуди вводимо позначення:

$$X_L = \omega L$$

індуктивний опір (належить до реактивних опорів) [Ом].

$$U_L = X_L I.$$

Фазовий зсув:

$$\varphi_L = \frac{\pi}{2},$$

тобто напруга випереджає струм на чверть періоду.

На рис, в зображено відповідні графіки і векторну діаграму напруги і струму. Якщо струм заданий або проводиться довільно, то напруга займає відносно нього чітко визначену позицію.

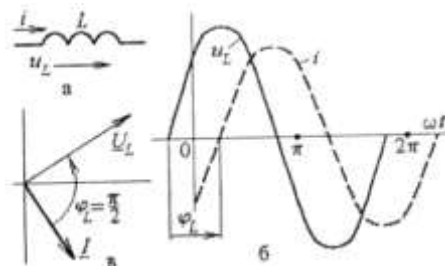


Рис.6

3. Ідеальний ємнісний елемент C

Виходячи із загального співвідношення визначаємо шукану функцію:

$$\begin{aligned} u_C &= \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int I_m \sin(\omega t + \psi_i) dt = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \\ &= \frac{1}{\omega C} I_m \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned}$$

де амплітуда напруги

$$U_m = \frac{1}{\omega C} I_m$$

вводимо позначення:

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

- ємнісний опір, який також належить до реактивних опорів, вимірюється в [Ом]. З урахуванням того, що

$$\dot{I}_m = \sqrt{2} I, \dot{U}_m = \sqrt{2} U$$

отримуємо:

$$U_C = X_C I$$

- закон Ома для діючих значень напруги і струму на ідеальному ємнісному елементі.
Фазові співвідношення: з початкова фаза напруги

$$\psi_u = \psi_i - \frac{\pi}{2}$$

фазовий зсув:

$$\varphi_C = -\frac{\pi}{2}$$

(струм випереджає за фазою напругу на чверть періоду).

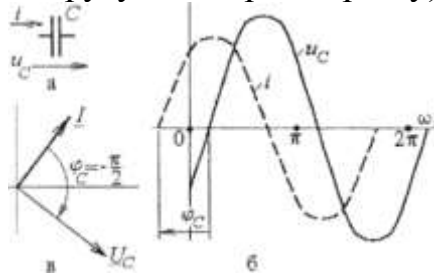


Рис. 7

На рис., в подано графіки і векторну діаграму напруги і струму. Струм заданий або проводиться довільно, а напруга займає відносно нього чітко визначену позицію.

4. Миттєва, повна, активна та реактивна потужності змінного струму.

Трикутник потужностей. Коефіцієнт потужності та його економічне значення.

Схема зірка

Наведемо назви напруг і струмів, відображених на схемі:

U_A, U_B, U_C - фазні напруги в мережі – $U_{\text{фм}}$;

U_a, U_b, U_c - фазні напруги на навантаженні - $U_{\text{фн}}$;

I_A, I_B, I_C - лінійні струми – $I_{\text{ф}}$;

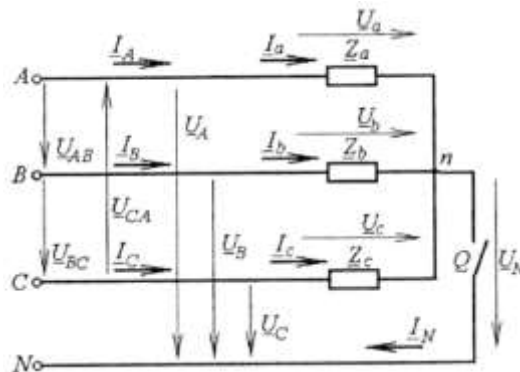


Рис. 8

I_a, I_b, I_c – фазні струми - $I_{\text{ф}}$;

I_N - струм нейтралі;

U_m - напруга зміщення нейтралі.

При розрахунках трифазного навантаження звичайно вважається, що в мережі задана лінійна напруга $U_{\text{л}}$ ($U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{л}}$), а також параметри кожної фази навантаження, тобто повні опори Z_a, Z_b, Z_c і фазові зсуви напруги і струму на них $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$.

У всіх варіантах для схеми «зірка» фазні напруги в мережі визначаються на основі отриманого раніше співвідношення:

$$U_A = U_B = U_C = U_{\text{фм}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$$

За наявності нейтрального проводу (вимикач Q замкнений) на фазах приймача встановлюється така ж симетрична система фазних напруг, як і в мережі, тобто $U_a = U_A$;

$U_b = U_B$; $U_c = U_C$ (використовуючи векторне зображення, маємо на увазі рівність відповідних напруг за величиною і фазою) або для діючих значень $U_{\text{фн}} = U_{\text{фм}}$.

За відсутності нейтрального проводу (вимикач Q розімкнутий) ситуація рівності відповідних фазних напруг $U_a = U_A$; $U_b = U_B$; $U_c = U_C$ або $U_{\text{фн}} = U_{\text{фм}}$ забезпечується тільки при симетричному навантаженні.

Для вказаних ситуацій при $U_{\text{фн}} = U_{\text{фш}}$ розрахунок має такий порядок.

За законом Ома визначаються фазні струми:

$$I_a = \frac{U_a}{Z_a}; I_b = \frac{U_b}{Z_b}; I_c = \frac{U_c}{Z_c}$$

При симетричному навантаженні, з урахуванням рівності опорів фаз $Z_a = Z_b = Z_c = Z_{\text{ф}}$ і фазних напруг $U_a = U_b = U_c = U_{\text{фн}}$, отримуємо однакові фазні струми $I_{\text{ф}} = I_a = I_b = I_c$, при несиметричному навантаженні – різні струми.

За схемою «зірка» лінійні і фазні струми дорівнюють один одному: $I_A = I_a$; $I_B = I_b$; $I_C = I_c$ або $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

Якщо є нейтральний провід, то на основі першого закону Кірхгофа струм у ньому:

$$I_N = I_a + I_b + I_c.$$

Це підсумовування стосується векторної форми струмів, тому скористаємося векторною діаграмою.

Ілюстрація відповідає симетричному навантаженню: спочатку будуємо симетричну систему фазних напруг, а потім однакові за довжиною вектори фазних струмів, кожний із яких проводимо під кутом $\varphi_{\text{ф}}$ по відношенню до своєї фазної напруги (фазовий зсув при симетричному навантаженні скрізь однаковий: $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_{\text{ф}}$). Для прикладу припустимо активно-індуктивний характер навантаження, тобто $\varphi_{\text{ф}} > 0$. Підсумовування за формулою при симетричному навантаженні дає струм нейтралі, який дорівнює нулю. Отже, при симетричному навантаженні нейтральний провід не потрібен.

Ілюстрація відповідає несиметричному навантаженню: знову спочатку будуємо симетричну систему фазних напруг, а потім різні за довжиною вектори фазних струмів, кожний із яких проводимо під своїм кутом φ_a , φ_b , φ_c по відношенню до своєї фазної напруги. Для прикладу припустимо $\varphi_a > 0$, $\varphi_b = 0$, $\varphi_c < 0$.

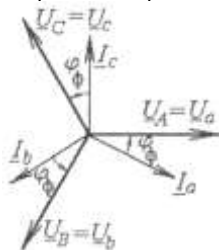


Рис. 9

Підсумовування за формулою дає струм нейтралі, який при несиметричному навантаженні не дорівнює нулю.

Розрахунковим шляхом струм нейтралі можна визначити за тією ж формулою, але проводячи попередньо обчислювання фазних струмів символічним методом

$$I_a = \frac{U_a}{Z_a}; I_b = \frac{U_b}{Z_b}; I_c = \frac{U_c}{Z_c},$$

де використовуються комплексні значення фазних напруг на навантаженні $U_a = U_{\text{фн}}$; $U_b = U_{\text{фн}} e^{j120^\circ}$; $U_c = U_{\text{фн}} e^{j240^\circ}$ і опорів фаз Z_a , Z_b , Z_c .

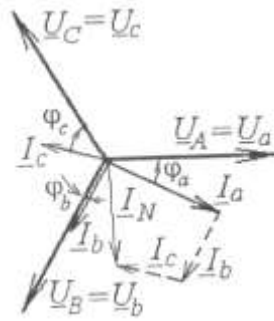


Рис. 10

Якщо при несиметричному навантаженні відбудеться обрив нейтрального проводу, то з'являється напруга «зміщення нейтралі» U_N , яка може бути обчислена символічним методом:

$$U_N = \frac{U_A Y_a + U_B Y_b + U_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}$$

де комплексні значення фазних напруг у мережі $U_A = U_{\text{ФМ}}$; $U_b = U_{\text{ФН}} e^{j120^\circ}$; $U_c = U_{\text{ФН}} e^{j240^\circ}$ і провідностей фаз $Y_a = \frac{1}{Z_a}$; $Y_b = \frac{1}{Z_b}$; $Y_c = \frac{1}{Z_c}$.

Тоді фазні напруги на приймачах на підставі другого закону Кірхгофа за рис. 4.13:

$$U_a = U_A - U_N; U_b = U_B - U_N; U_c = U_C - U_N$$

Ці напруги будуть різними: виникає так званий «перекіс фаз», який ілюструється за допомогою векторної діаграми. Тобто фазні напруги на навантаженні відрізняються одна від одної і від фазних напруг у мережі, що недопустимо.

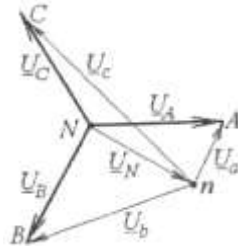


Рис. 11

Активну потужність у всіх випадках можна розраховувати для кожної з фаз приймача:

$$P_a = U_a I_a \cos \phi_a; P_b = U_b I_b \cos \phi_b; P_c = U_c I_c \cos \phi_c,$$

а для всієї «зірки»:

$$P_Y = P_a + P_b + P_c.$$

При симетричному навантаженні активну потужність можна розрахувати для однієї фази:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \phi_\phi,$$

тоді для всієї зірки $P_Y = 3P_\phi$.

При симетричному навантаженні з урахуванням того, що $I_\phi = I_L$ і $U_{\text{ФН}} = U_L / \sqrt{3}$, отримаємо вираз потужності через лінійні величини:

$$P_Y = \sqrt{3} U_L I_L \cos \phi_\phi.$$

Аналогічно для кола за схемою «зірка» розраховуються реактивні потужності

$$Q_a = U_a I_a \sin \phi_a; Q_b = U_b I_b \sin \phi_b;$$

$$Q_c = U_c I_c \sin \phi_c; Q_Y = Q_a + Q_b + Q_c$$

а при симетричному навантаженні:

$$Q_Y = 3U_\phi I_\phi \sin \phi_\phi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \phi_\phi$$

Схема трикутник

Наведемо назви напруг і струмів, відображених на схемі Δ : U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} - лінійні напруги U_M , причому при з'єднанні трикутником вони безпосередньо утворюють і фазні напруги U_ϕ на навантаженні U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} ;

Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} - опори фаз - Z_ϕ ;

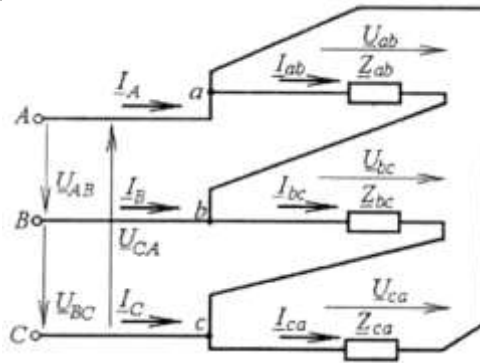


Рис. 12

I_A , I_B , I_C - лінійні струми - I_L ;

I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} - струми фазних навантажень (фазні струми) - I_ϕ .

При розрахунку трифазного навантаження, з'єданого за схемою «трикутник», припустимо, як і у випадку «зірки», що задано діючі значення лінійних напруг в мережі $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$, а також задано опори фаз за величиною, тобто Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} , і за характером, тобто ϕ_{ab} , ϕ_{bc} , ϕ_{ca} .

Решту величин можна визначити в наступному порядку.

Зі схеми видно, що фазні напруги дорівнюють лінійним $U_\phi = U_L$ і, отже, дорівнюють одна одній, тобто $U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_\phi$.

Тоді фазні струми за законом Ома:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}$$

При симетричному навантаженні, з урахуванням рівності опорів фаз $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_\phi$, отримуємо однакові фазні струми

$$I_\phi = I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = \frac{U_\phi}{Z_\phi}$$

Лінійні струми визначаються на підставі першого закону Кірхгофа: для вузла а за рис. 4.17 $I_A - I_{ab} + I_{ca} = 0$. Аналогічно робимо для вузлів b і c та отримуємо таким чином лінійні струми:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; I_B = I_{bc} - I_{ab}; I_C = I_{ca} - I_{bc}.$$

Ілюстрація відповідає симетричному навантаженню: спочатку будуюмо симетричну систему фазних напруг (вони ж є лінійними напругами), а потім однакові за довжиною вектори фазних струмів, кожний із яких проводимо під кутом ϕ_ϕ по відношенню до своєї фазної напруги (фазовий зсув при симетричному навантаженні скрізь однаковий: $\phi_{ab} = \phi_{bc} - \phi_{ca} = \phi_\phi$). Для прикладу припустимо активно-ємнісний характер навантаження, тобто $\phi_\phi < 0$.

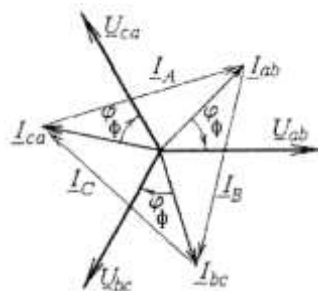


Рис. 13

Лінійні струми будуюмо на основі формул, як різницю векторів відповідних фазних струмів.

Із діаграми витягнемо трикутник струмів (рис. 4.19) і з геометричних викладок отримуємо класичне співвідношення між лінійним і фазним струмами для трифазного симетричного навантаження за схемою «трикутник»:

$$\frac{I_{\Delta}}{I_{\Phi}} = \sqrt{3} \text{ або } I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{\Phi}$$

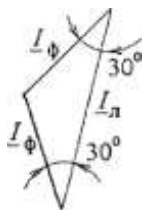


Рис. 14

Ілюстрація відповідає несиметричному навантаженню: знову спочатку будуюмо симетричну систему фазних напруг, а потім різні за довжиною вектори фазних струмів, кожний із яких проводимо під своїм кутом φ_{ab} , φ_{bc} , φ_{ca} відносно своєї фазної напруги (припустимо $\varphi_{ab} > 0$; $\varphi_{bc} < 0$; $\varphi_{ca} = 0$).

Лінійні струми будуюмо на основі формул, як різниці векторів відповідних фазних струмів. Розрахунковим шляхом лінійні струми можна визначити за тими ж формулами як різниці фазних струмів символічним методом, але проводячи попередньо обчислення комплексних значень фазних струмів:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}$$

де використовуються комплексні значення фазних напруг на навантаженні $U_{ab}=U_{\Phi}$; $U_{bc}=U_{\Phi}e^{j120^\circ}$; $U_{ca}=U_{\Phi}e^{j240^\circ}$ і опорів Фаз Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} .

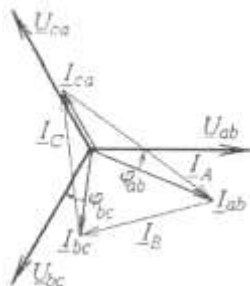


Рис. 15

Активну потужність у загальному випадку можна розрахувати для кожної із фаз приймача:

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

а для всього «трикутника»:

$$P_{\Delta} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}$$

При симетричному навантаженні активну потужність можна розрахувати для однієї фази:

$$P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi_{\Phi},$$

тоді для всього трикутника $P_{\Delta} = 3P_{\Phi}$.

При симетричному навантаженні, з урахуванням того, що $I_{\Phi} = \frac{I_{\Delta}}{\sqrt{3}}$ і $U_{\Phi} = U_{\Delta}$, отримуємо вираз потужності через лінійні величини:

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} U_{\Delta} I_{\Delta} \cos \varphi_{\Phi},$$

що повторює формулу.

Аналогічно розраховуються реактивні потужності для кола за схемою «трикутник»:

$$Q_{ab} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab}; Q_{bc} = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc};$$

$$Q_{ca} = U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca}; Q_{\Delta} = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}$$

а при симетричному навантаженні:

$$Q_{\Delta} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi_{\Phi} = \sqrt{3} U_{\pi} I_{\pi} \sin \varphi_{\Phi}$$

5. Коло синусоїдного струму з послідовним та паралельним з'єднанням R, L, C.

Послідовне з'єднання ідеальних елементів R, L, C є поширеним у схемах заміщення кіл синусоїдного струму. Разом з тим, воно є простішою ланкою, на основі якої будуються розрахунки цих кіл при їхній більш складній структурі.

Розрахункові співвідношення напруги і струму для ділянки кола, що розглядається, визначаються за допомогою вже виведених співвідношень для кожного ідеального елемента окремо:

$$U_R = RI; \varphi_R = 0; U_L = X_L I; \varphi_L = \frac{\pi}{2}; U_C = X_C I; \varphi_C = -\frac{\pi}{2}.$$

На підставі другого закону Кірхгофа при послідовному з'єднанні елементів $u = u_R + u_L + u_C$.

Струм синусоїдний, тому всі напруги будуть синусоїдними. Це дозволяє перейти від їхніх миттєвих значень до векторного зображення:

$$U = U_R + U_L + U_C.$$

Проведемо підсумовування за допомогою векторної діаграми, яку подано на рис. 3.13, а. Пояснимо порядок її побудови.

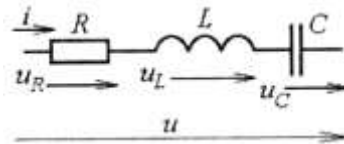


Рис. 16

Перший вектор проводиться довільно. На цю роль краще брати величину, яка є спільною для всієї схеми. У даному випадку - це струм I, для якого приймаємо довільно початкову фазу $\psi_i = 0$.

Далі, за відомими вже правилами проводимо вектори напруг ідеальних елементів U_R , U_L і U_C під відповідними кутами φ_R , φ_L і φ_C до вектора струму. Тут припускаємо, що $X_L > X_C$, тому вектор U_L вийшов довше вектора U_C , але, в принципі, можуть бути будь-які співвідношення довжин векторів U_R , U_L і U_C .

Вектор загальної напруги отримується геометричним додаванням цих векторів у відповідності з формулою.

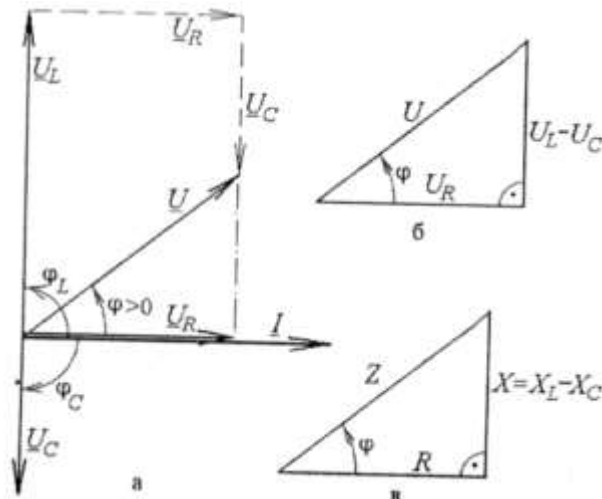


Рис. 17

Із векторної діаграми витягнемо її фрагмент - трикутник напруг. Із цього трикутника отримаємо діюче значення напруги на ділянці кола з послідовним з'єднанням ідеальних елементів

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

або після підстановки

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

а потім

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

Останній вираз в формі

$$U = ZI$$

є законом Ома для ділянки з послідовним з'єднанням ідеальних елементів.

Тут уведено поняття - повний опір такої ділянки кола [Ом]

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

Фазовий зсув напруги відносно струму (також за трикутником напруг)

$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctg \frac{X_L I - X_C I}{RI} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}.$$

У цьому випадку $\varphi > 0$, а в принципі можливі межі зміни у залежності від співвідношення опорів R , X_L і X_C .

Якщо в трикутнику напруг довжини боків поділити на струм I , то отримаємо трикутник опорів, котрий показано. Цей трикутник наочно ілюструє співвідношення активного, реактивного і повного опорів і сприяє їхньому взаємному вираженню, в тому числі з використанням фазового зсуву φ . Сполучення, що часто повторюється, позначено:

$$X = X_L - X_C$$

і названо реактивним опором.

Тема 4. Трифазні електричні системи

План

1. Вироблення трифазного струму. З'єднання фаз генератора і споживача зіркою і трикутником. Співвідношення між лінійними і фазними струмами і напругами.
2. Потужність і коефіцієнт потужності трифазної системи та шлях його підвищення.

1. Вироблення трифазного струму. З'єднання фаз генератора і споживача зіркою і трикутником. Співвідношення між лінійними і фазними струмами і напругами.

Трифазною називається електрична система, в якій діють три синусоїдних ЕРС, які індуковані в одному джерелі електроенергії і мають однакову частоту f , але відрізняються одна від одної за фазою на $1/3$ періоду T .

Джерелом, що виробляє таку систему ЕРС, є трифазний синхронний генератор, схематично показаний на рис. 1.

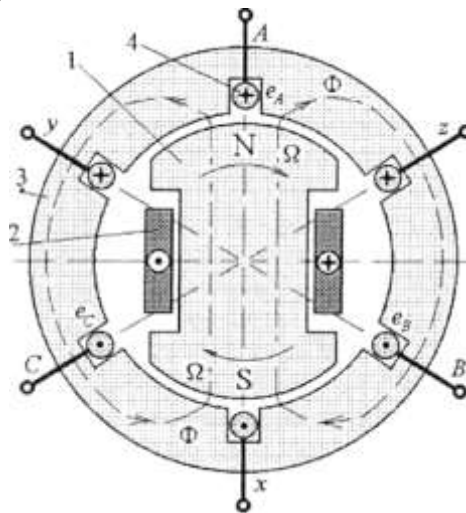


Рис. 1

Індуктор, який складається з осердя 1 і розміщеної на ньому обмотки збудження 2, обертається з кутовою швидкістю Ω . По цій обмотці пропускають постійний струм і вона створює магнітне поле. Магнітний потік Φ поля збудження (показані його силові лінії) замикається по осердю статора 3.

Обмотка статора 4 складається із трьох фаз: це три котушки або фазні обмотки Ax , Bx , Cx , зсунуті за кутом на 120° одна відносно одної.

Магнітне поле індуктора (ротора), що обертається, індукує у фазних обмотках нерухомого статора ЕРС e_A , e_B , e_C у відповідності до закону електромагнітної індукції. Ці ЕРС змінюються за синусоїдним законом. І через те, що фази обмотки статора зсунуті на $1/3$ обороту, ЕРС в часі зсунуті одна відносно одної на $1/3$ періоду. Кутова частота ЕРС дорівнює кутовій швидкості індуктора Ω , тобто $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$.

Векторна діаграма цієї системи ЕРС подана на рис. 3.

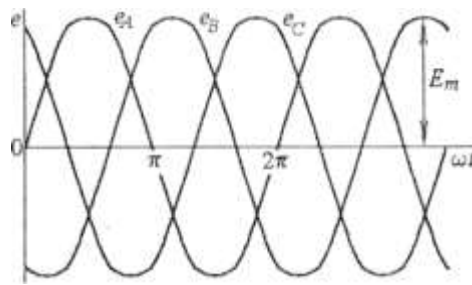


Рис. 2

Електричні мережі побутового і локального виробничого призначення можуть бути однофазними, але насправді вони є тільки частиною трифазної системи.

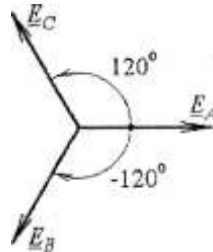


Рис. 3

Приймачі електроенергії можуть бути одно- і трифазними. Основним трифазним приймачем електроенергії є трифазний асинхронний електродвигун.

Три фази обмотки статора синхронного генератора можуть бути з'єднані двома основними способами: в «зірку» або «трикутник». Розглянемо ці варіанти з'єднання фаз генератора і подамо напруги, що виникають на його вихідних затискачах.

1. Зірка (див. рис. 4): кінці фаз x, y, z (рис. 1) з'єднані в один вузол IV - нейтральну точку. З початків фаз A, B, C виходять відповідні проводи A, B, C, які називаються лінійними, провід із точки IV є нейтральним.

Схема «зірка» має дві модифікації: «зірка» без нейтрального проводу (позначення Y) – три провідна лінія електропередачі (ЛЕП); і «зірка» з нейтральним проводом (позначення Y) - чотирипровідна ЛЕП.

Розглянемо систему отриманих напруг (рис. 4):

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} - ці напруги між лінійними проводами називаються лінійними;

U_A, U_B, U_C - фазні напруги отримуються між одним із лінійних проводів і нейтральним проводом.

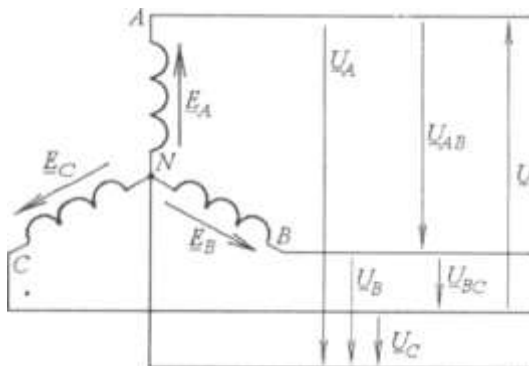


Рис. 4

З рис. 4 очевидно, що $U_A = E_A$, $U_B = E_B$, $U_C = E_C$, тому всі фазні напруги можна подати, як і ЕРС, аналітично:

$$u_A = U_m \sin \omega t; u_B = U_m \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi); u_C = U_m \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi),$$

а потім і за допомогою векторної діаграми (рис. 5).

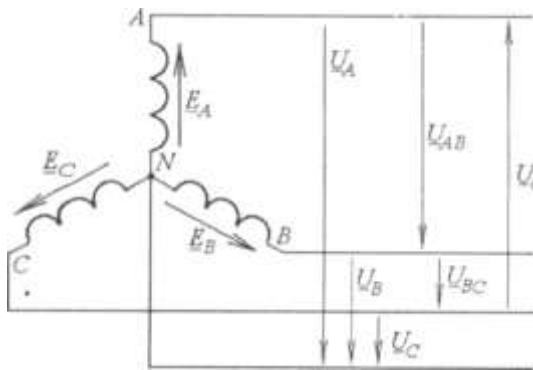


Рис. 5

Така система напруг називається симетричною: у трьох напруг однакові амплітуда U_m і кутова частота ω , вони мають рівномірний часовий фазовий зсув на $1/3$ періоду.

Визначимо зв'язок між лінійними і фазними напругами за другим законом Кірхгофа, проходячи за вказаним контуром на рис. 6 в системі проводів чотирьохпроводної трифазної ЛЕП:

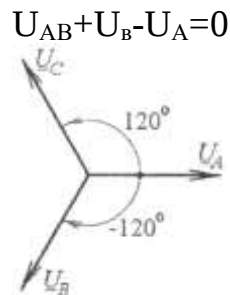


Рис. 6

Аналогічно можна скласти рівняння для інших напруг і таким чином отримати лінійні напруги:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A$$

Побудуємо ці напруги на векторній діаграмі. Спочатку будуємо, як і на рис. 5, симетричну систему векторів фазних напруг. Вектори лінійних напруг будуємо за формулами як різниці векторів відповідних фазних напруг. У результаті побудовань бачимо, що лінійні напруги створюють свою трифазну симетричну систему.

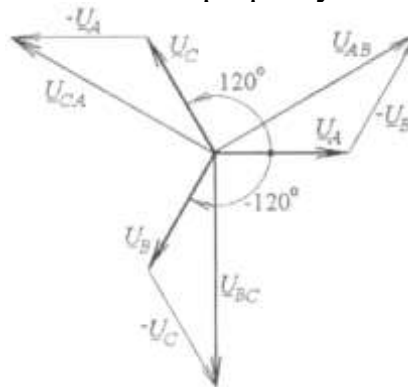


Рис. 7

З отриманої векторної діаграми (рис. 7) витягнемо геометричну фігуру - трикутник напруг (рис. 8), де U_ϕ - фазна напруга, U_L - лінійна напруга.

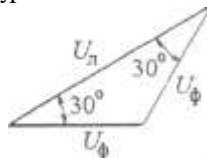


Рис. 8

Розглянемо цей трикутник і з геометричних співвідношень отримаємо класичне співвідношення лінійної і фазної напруг у чотирипровідній ЛЕП:

$$\frac{U_{\Delta}}{U_{\Phi}} = \sqrt{3}$$

Виходячи з цього, існує номінальний ряд напруг, який подано частково в табл. 1.

Таблиця 1

U _ф , В	U _л , В
127	220
220	380
380	660

На закінчення зауважимо, що в трипровідній ЛЕП може бути тільки система із трьох лінійних напруг, вказаних на рис. 4 і рис. 7.

2. **Трикутник Δ** (рис. 9): кінці фаз х, у, z (див. рис. 1) з'єднані з початками наступних фаз В, С, А.

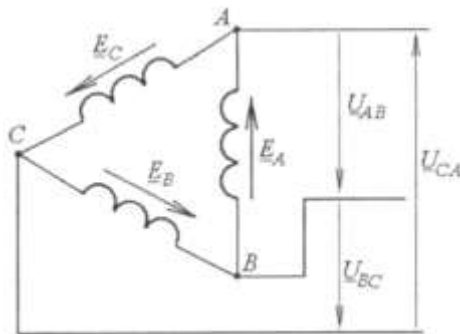


Рис. 9

У цьому випадку від джерела йде трипровідна ЛЕП з лінійними проводами А, В, С і тут існує тільки система лінійних напруг U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Із рис. 9 випливає, що:

$$U_{AB} = E_A, U_{BC} = E_B, U_{CA} = E_C$$

тому всі ці лінійні напруги можна подати так само, як і ЕРС в обмотці статора трифазного генератора: аналітично, графічно або за допомогою векторної діаграми, зображеної на рис. 10.

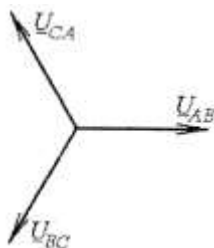


Рис. 10

2. Потужність і коефіцієнт потужності трифазної системи та шлях його підвищення.

Схема зірка

Наведемо назви напруг і струмів, відображених на схемі:

U_A, U_B, U_C - фазні напруги в мережі – $U_{\Phi M}$;

U_a, U_b, U_c - фазні напруги на навантаженні - $U_{\Phi H}$;

I_A, I_B, I_C - лінійні струми – I_{Φ} ;

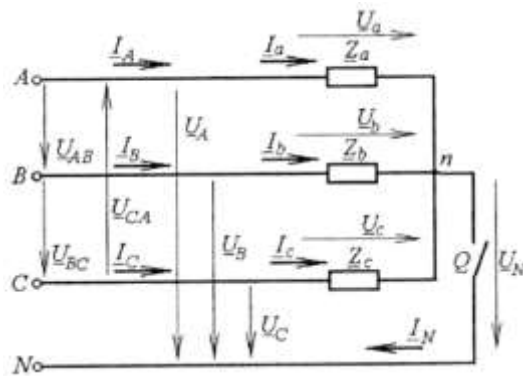


Рис. 11

I_a, I_b, I_c – фазні струми - I_ϕ ;

I_N - струм нейтралі;

U_m - напруга зміщення нейтралі.

При розрахунках трифазного навантаження звичайно вважається, що в мережі задана лінійна напруга U_L ($U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$), а також параметри кожної фази навантаження, тобто повні опори Z_a, Z_b, Z_c і фазові зсуви напруги і струму на них ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c .

У всіх варіантах для схеми «зірка» фазні напруги в мережі визначаються на основі отриманого раніше співвідношення:

$$U_A = U_B = U_C = U_{\phi m} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

За наявності нейтрального проводу (вимикач Q замкнений) на фазах приймача встановлюється така ж симетрична система фазних напруг, як і в мережі, тобто $U_a = U_A$; $U_b = U_B$; $U_c = U_C$ (використовуючи векторне зображення, маємо на увазі рівність відповідних напруг за величиною і фазою) або для діючих значень $U_{\phi n} = U_{\phi m}$.

За відсутності нейтрального проводу (вимикач Q розімкнений) ситуація рівності відповідних фазних напруг $U_a = U_A$; $U_b = U_B$; $U_c = U_C$ або $U_{\phi n} = U_{\phi m}$ забезпечується тільки при симетричному навантаженні.

Для вказаних ситуацій при $U_{\phi n} = U_{\phi m}$ розрахунок має такий порядок.

За законом Ома визначаються фазні струми:

$$I_a = \frac{U_a}{Z_a}; I_b = \frac{U_b}{Z_b}; I_c = \frac{U_c}{Z_c}$$

При симетричному навантаженні, з урахуванням рівності опорів фаз $Z_a = Z_b = Z_c = Z_\phi$ і фазних напруг $U_a = U_b = U_c = U_{\phi n}$, отримуємо однакові фазні струми $I_\phi = I_a = I_b = I_c$, при несиметричному навантаженні – різні струми.

За схемою «зірка» лінійні і фазні струми дорівнюють один одному: $I_A = I_a$; $I_B = I_b$; $I_C = I_c$ або $I_L = I_\phi$.

Якщо є нейтральний провід, то на основі першого закону Кірхгофа струм у ньому:

$$I_N = I_a + I_b + I_c.$$

Це підсумовування стосується векторної форми струмів, тому скористаємося векторною діаграмою.

Ілюстрація відповідає симетричному навантаженню: спочатку будуюмо симетричну систему фазних напруг, а потім однакові за довжиною вектори фазних струмів, кожний із яких проводимо під кутом ϕ_ϕ по відношенню до своєї фазної напруги (фазовий зсув при симетричному навантаженні скрізь однаковий: $\phi_a = \phi_b = \phi_c = \phi_\phi$). Для прикладу припустимо активно-індуктивний характер навантаження, тобто $\phi_\phi > 0$. Підсумовування за формулою при симетричному навантаженні дає струм нейтралі, який дорівнює нулю. Отже, при симетричному навантаженні нейтральний провід не потрібен.

Ілюстрація відповідає несиметричному навантаженню: знову спочатку будемо симетричну систему фазних напруг, а потім різні за довжиною вектори фазних струмів, кожний із яких проводимо під своїм кутом $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ по відношенню до своєї фазної напруги. Для прикладу припустимо $\varphi_a > 0, \varphi_b = 0, \varphi_c < 0$.

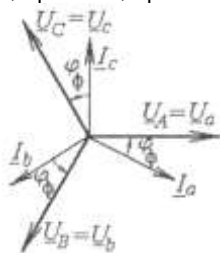


Рис. 12

Підсумовування за формулою дає струм нейтралі, який при несиметричному навантаженні не дорівнює нулю.

Розрахунковим шляхом струм нейтралі можна визначити за тією ж формулою, але проводячи попередньо обчислювання фазних струмів символічним методом

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a}; \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b}; \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c},$$

де використовуються комплексні значення фазних напруг на навантаженні $U_a = U_{\text{фн}}$; $U_b = U_{\text{фн}}e^{j120^\circ}$; $U_c = U_{\text{фн}}e^{j240^\circ}$ і опорів фаз Z_a, Z_b, Z_c .

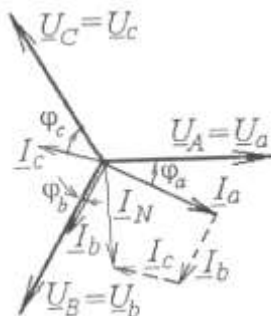


Рис. 13

Якщо при несиметричному навантаженні відбудеться обрив нейтрального проводу, то з'являється напруга «зміщення нейтралі» U_N , яка може бути обчислена символічним методом:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

де комплексні значення фазних напруг у мережі $U_A = U_{\text{ФМ}}$; $U_b = U_{\text{фн}}e^{j120^\circ}$; $U_c = U_{\text{фн}}e^{j240^\circ}$ і провідностей фаз $Y_a = \frac{1}{Z_a}$; $Y_b = \frac{1}{Z_b}$; $Y_c = \frac{1}{Z_c}$.

Тоді фазні напруги на приймачах на підставі другого закону Кірхгофа за рис. 4.13:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N.$$

Ці напруги будуть різними: виникає так званий «перекіс фаз», який ілюструється за допомогою векторної діаграми. Тобто фазні напруги на навантаженні відрізняються одна від одної і від фазних напруг у мережі, що недопустимо.

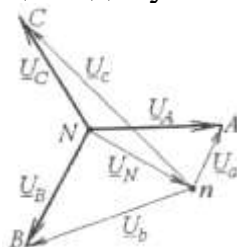


Рис. 14

Активну потужність у всіх випадках можна розраховувати для кожної з фаз приймача:

$$P_a = U_a I_a \cos \varphi_a; P_b = U_b I_b \cos \varphi_b; P_c = U_c I_c \cos \varphi_c,$$

а для всієї «зірки»:

$$P_Y = P_a + P_b + P_c.$$

При симетричному навантаженні активну потужність можна розрахувати для однієї фази:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi,$$

тоді для всієї зірки $P_Y = 3P_\phi$.

При симетричному навантаженні з урахуванням того, що $I_\phi = I_L$ і $U_{\phi n} = U_L / \sqrt{3}$, отримаємо вираз потужності через лінійні величини:

$$P_Y = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_\phi.$$

Аналогічно для кола за схемою «зірка» розраховуються реактивні потужності

$$Q_a = U_a I_a \sin \varphi_a; Q_b = U_b I_b \sin \varphi_b;$$

$$Q_c = U_c I_c \sin \varphi_c; Q_Y = Q_a + Q_b + Q_c$$

а при симетричному навантаженні:

$$Q_Y = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi_\phi$$

Схема трикутник

Наведемо назви напруг і струмів, відображених на схемі Δ : U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} - лінійні напруги U_M , причому при з'єднанні трикутником вони безпосередньо утворюють і фазні напруги U_ϕ на навантаженні U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ;

Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} - опори фаз - Z_ϕ ;

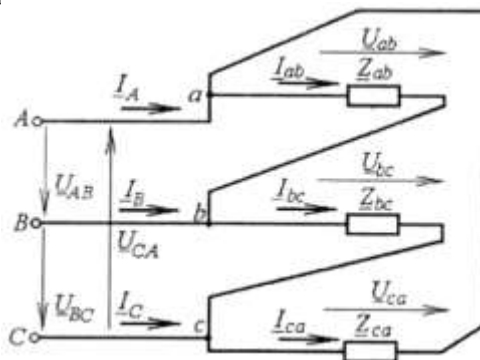


Рис. 15

I_A, I_B, I_C - лінійні струми - I_L ;

I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} - струми фазних навантажень (фазні струми) - I_ϕ .

При розрахунку трифазного навантаження, з'єданого за схемою «трикутник», припустимо, як і у випадку «зірки», що задано діючі значення лінійних напруг в мережі $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$, а також задано опори фаз за величиною, тобто Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} , і за характером, тобто $\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}$.

Решту величин можна визначити в наступному порядку.

Зі схеми видно, що фазні напруги дорівнюють лінійним $U_\phi = U_L$ і, отже, дорівнюють одна одній, тобто $U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_\phi$.

Тоді фазні струми за законом Ома:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}$$

При симетричному навантаженні, з урахуванням рівності опорів фаз $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_\phi$, отримуємо однакові фазні струми

$$I_{\phi} = I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}}$$

Лінійні струми визначаються на підставі першого закону Кірхгофа: для вузла А-
 $I_{ab} + I_{ca} = 0$. Аналогічно робимо для вузлів В і С та отримуємо таким чином лінійні струми:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; I_B = I_{bc} - I_{ab}; I_C = I_{ca} - I_{bc}.$$

Ілюстрація відповідає симетричному навантаженню: спочатку будуємо симетричну систему фазних напруг (вони ж є лінійними напругами), а потім однакові за довжиною вектори фазних струмів, кожний із яких проводимо під кутом φ_{ϕ} по відношенню до своєї фазної напруги (фазовий зсув при симетричному навантаженні скрізь однаковий: $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi_{\phi}$). Для прикладу припустимо активно-ємнісний характер навантаження, тобто $\varphi_{\phi} < 0$.

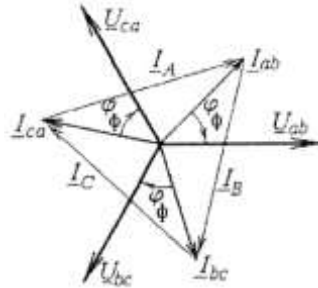


Рис. 16

Лінійні струми будуюмо на основі формул, як різницю векторів відповідних фазних струмів.

Із діаграми витягнемо трикутник струмів і з геометричних викладок отримуємо класичне співвідношення між лінійними і фазними струмами для трифазного симетричного навантаження за схемою «трикутник»:

$$\frac{I_{\pi}}{I_{\phi}} = \sqrt{3} \text{ або } I_{\pi} = \sqrt{3} I_{\phi}$$

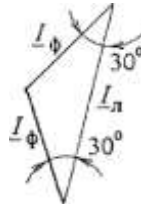


Рис. 17

Ілюстрація відповідає несиметричному навантаженню: знову спочатку будуємо симетричну систему фазних напруг, а потім різні за довжиною вектори фазних струмів, кожний із яких проводимо під своїм кутом φ_{ab} , φ_{bc} , φ_{ca} відносно своєї фазної напруги (припустимо $\varphi_{ab} > 0$; $\varphi_{bc} < 0$; $\varphi_{ca} = 0$).

Лінійні струми будуюмо на основі формул, як різниці векторів відповідних фазних струмів. Розрахунковим шляхом лінійні струми можна визначити за тими ж формулами як різниці фазних струмів символічним методом, але проводячи попередньо обчислення комплексних значень фазних струмів:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}$$

де використовуються комплексні значення фазних напруг на навантаженні $U_{ab} = U_{\phi}$; $U_{bc} = U_{\phi} e^{j120^\circ}$; $U_{ca} = U_{\phi} e^{j240^\circ}$ і опорів Фаз Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} .

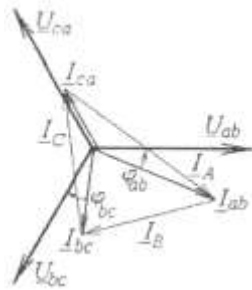


Рис. 18

Активну потужність у загальному випадку можна розрахувати для кожної із фаз приймача:

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

а для всього «трикутника»:

$$P_{\Delta} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}$$

При симетричному навантаженні активну потужність можна розрахувати для однієї фази:

$$P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi_{\Phi},$$

тоді для всього трикутника $P_{\Delta} = 3P_{\Phi}$.

При симетричному навантаженні, з урахуванням того, що $I_{\Phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$ і $U_{\Phi} = U_{\text{л}}$, отримуємо вираз потужності через лінійні величини:

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{л}},$$

що повторює формулу.

Аналогічно розраховуються реактивні потужності для кола за схемою «трикутник»:

$$Q_{ab} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab}; Q_{bc} = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc};$$

$$Q_{ca} = U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca}; Q_{\Delta} = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}$$

а при симетричному навантаженні:

$$Q_{\Delta} = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi_{\Phi} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{л}}$$

Тема 5. Трансформатори

План

1. Призначення, класифікація та сфера застосування трансформаторів. Будова та принцип дії однофазного трансформатора. Коефіцієнт трансформації. Досліди неробочого ходу, навантаження та короткого замикання. Втрати енергії та ККД.

2. Будова, принцип дії та сфера застосування трифазних трансформаторів. Поняття про групи з'єднань.

1. Призначення, класифікація та сфера застосування трансформаторів.

Трансформатори широко використовуються при передачі і розподілу електроенергії, для живлення спеціальних пристроїв, а також в системах автоматики і обчислювальної техніки, в побуті. Зважаючи на багаторазове трансформування електроенергії, загальна потужність трансформаторів у кілька разів (6 – 8) перевищує загальну потужність генераторів, що виробляють електричну енергію.

Враховуючи значну різноманітність трансформаторів, вони класифікуються за низкою показників. Досить поширеною є класифікація за призначенням:

- *силові* – призначені для зниження втрат в лініях електропередач (ЛЕП): спершу напруга підвищується, а отже, струм знижується, і передається електрична енергія при напрузі 500, 750 кВ і більше, а потім знижується, в кілька етапів, до робочої напруги 220, 380, 660 В (слід зауважити, що в процесі передачі електроенергії підвищення напруги в 10 раз, знижує втрати в ЛЕП у 100 разів);

- *спеціальні силові* – для живлення електричних дугових печей та зварювальних пристроїв;

- *вимірювальні трансформатори струму та напруги* – призначені для розширення меж вимірювальних приладів, живлення обмоток пристроїв захисту і автоматики в лініях електропередач та відокремлення вимірювальних кіл від силових;

- *трансформатори автоматики та обчислювальної техніки* (пік-трансформатори, імпульсні, множники частоти та числа фаз тощо) – для створення сигналів та імпульсів у колах автоматики і обчислювальної техніки;

- *трансформатори побутових пристроїв*, які мають значну кількість обмоток і використовуються у побутових пристроях, телевізорах, радіоприймачах тощо.

Крім цього, широко використовується поділ трансформаторів за іншими признаками, наприклад: за числом фаз (*однофазні, трифазні, багатофазні*); за способом охолодження (*з природним і штучним, сухі та масляні*); за числом обмоток на фазу (*двообмоткові, триобмоткові і багатообмоткові*); за конструкцією магнітної системи (*площині, просторові, стрижневі, броньові і бронестрижневі*) та інший.

В даній лекції будемо розглядати тільки силові трансформатори загального призначення.

2. Принцип дії трансформатора

Найпростіший силовий трансформатор складається з магнітопроводу (осердя), виконаного з феромагнітного матеріалу (звичайно, це електротехнічна сталь) та двох (або більше) обмоток. Обмотки розташовані на *стрижнях 1* магнітопроводу, які з'єднуються між собою *ярмами 2* (рис. 1). Магнітопровід служить для підсилення магнітного потоку, що створюється струмами обмоток, та зосередження його у матеріалі з хорошими магнітними властивостями. Існують трансформатори, у яких відсутнє феромагнітне осердя, але застосовуються вони в тільки окремих випадках для перетворення струмів високої частоти.

Обмотка, яка вмикається до мережі, напругою U_1 , із число витків W_1 , називається первинною, а обмотка W_2 , до якої вмикається навантаження Z_n – вторинною. Кожна з цих обмоток має повний комплексний опір Z_1 і Z_2 , відповідно:

$$Z_1 = R_1 + jX_1; \quad (1)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2, \quad (2)$$

де R_1, R_2 – реальні їх частини, що називаються активними опорами; $X_1; X_2$ – уявні частини або індуктивні опори. Індекс 1 – відноситься до первинної, а 2 – до вторинної обмотки; j – поворотний одиничний векторний множник.

Обмотки W_1 , та W_2 закріплюються на стрижнях нерухомо, електричний зв'язок між ними відсутній, а є тільки магнітний, що здійснюється змінним магнітним потоком Φ , тобто потужність від первинної обмотки до вторинної передається лише за рахунок електромагнітного зв'язку. Слід зазначити, що обмотки можуть бути сполучені також і електрично, тоді трансформатор називається *автотрансформатором*, і енергія в ньому передається як електромагнітним шляхом, так і електричним.

Дія трансформатора основана на явищі електромагнітної індукції: якщо обмотка перетинається змінним магнітним полем, то в її витках створюється ЕРС. Фізичні процеси, що відбуваються в трансформаторі, при ввімкненні його до мережі, можна зобразити схемою (рис. 2). На ній усі величини, крім числа витків W_1 та W_2 , є комплексними синусоїдальними векторними величинами, тому літери, що їх позначають, підкреслені і будуть підкреслюватись і надалі (ці ж самі літери, але без підкреслення будуть позначати скалярні значення відповідних величин).

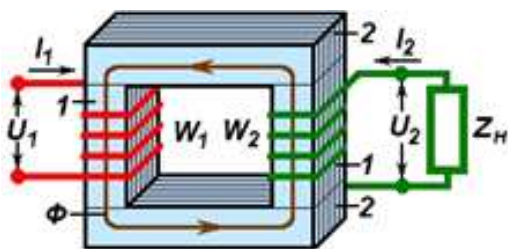


Рисунок 1 – Електромагнітна схема однофазного трансформатора



Рисунок 2 – Схема до пояснення принципу дії трансформатора

При ввімкненні до мережі з номінальною напругою U_1 первинної обмотки W_1 по її витках протікає струм I_1 і створює намагнічувальну силу $F_1 = I_1 \cdot W_1$. В магнітній системі трансформатора з магнітним опором R_m виникає потік $\Phi_1 = F_1 / R_m$. Цей потік в часі змінюється за синусоїдальним законом, як і напруга мережі, а в просторі осердя трансформатора пульсує, перетинаючи витки первинної W_1 та вторинної W_2 обмоток, і створює в них відповідно ЕРС E_1 та E_2 .

ЕРС первинної обмотки E_1 називається *ЕРС самоіндукції*, її миттєве значення e_1 :

$$e_1 = -W_1 \cdot d\phi / dt, \quad (3)$$

у вторинній обмотці – ЕРС взаємоіндукції E_2 із миттєвим значенням e_2 :

$$e_2 = -W_2 \cdot d\phi/dt, \quad (4)$$

де $d\phi/dt$ – швидкість зміни магнітного потоку трансформатора в часі.

При НХ ЕРС E_2 буде рівна напрузі U_2 , що має місце на розімкнених затискачах вторинної обмотки, саме вона і є номінальною вторинною напругою $U_{2ном}$ трансформатора. Якщо порівняти первинну та вторинну напруги трансформатора в цьому режимі, то вони будуть співвідноситися між собою приблизно так, як числа витків відповідних обмоток W_1 та W_2 . Пояснюється це тим, що ЕРС E_1 майже рівна прикладеній напрузі U_1 , та співвідношеннями (2.3) та (2.4). Кожної миті e_1 та миттєве значення напруги u_1 майже урівноважують одна одну, тому струм НХ I_0 досить незначний.

Якщо ввімкнути навантаження Z_n , під дією ЕРС E_2 в колі вторинної обмотки потече струм I_2 , який створить власну намагнічувальну силу $F_2 = I_2 \cdot W_2$ і, відповідно, потік Φ_2 . Потоки Φ_1 та Φ_2 , замикаючись в одній магнітній системі, створюють результатний потік Φ_0 :

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (5)$$

Враховуючи, що первинна обмотка ввімкнена до мережі, потужність якої можна розглядати як нескінченно велику, в порівнянні з потужністю трансформатора, величина діючого значення змінного магнітного потоку Φ_0 , при будь-якій зміні навантаження, змінюватись не може, тобто завжди залишається такою, щоб магнітна система була насиченою, як і при НХ. Дійсно, якщо магнітний потік Φ_2 направлений назустріч потоку Φ_1 , то зниження Φ_0 неможливе, тому що зростання потоку Φ_2 автоматично компенсується з мережі збільшенням струму I_1 , а отже, і магнітного потоку Φ_1 , а магнітна система залишається насиченою. Саме з цієї причини відсутнє поняття “реакції якоря” у магнітній системі трансформатора. Як результат, зростання струму навантаження на затискачах вторинної обмотки трансформатора I_2 автоматично приводить до зростання струму I_1 , завдяки насиченому стану магнітної системи й незмінності діючого значення результатного (основного) магнітного потоку Φ_0 .

Як витікає зі співвідношень (3) та (4), ЕРС e_1 та ЕРС e_2 , що індукуються в обмотках трансформатора, відрізняються одна від іншої лише за рахунок різної кількості витків. Тому, використовуючи необхідне співвідношення витків, можна створити трансформатор на будь-яке співвідношення напруг.

Обмотка трансформатора, яка має більшу кількість витків, називається обмоткою вищої напруги (ВН), а обмотка з меншою кількістю витків – обмоткою нижчої напруги (НН). Якщо первинною обмоткою є обмотка ВН, то трансформатор називається знижувальним, якщо ж НН, то – підвищувальним.

Як і електрична машина, трансформатор має властивість оборотності, тобто один і той же трансформатор може використовуватись і як знижувальний, і як підвищувальний. Але, звичайно, кожен трансформатор має окреме призначення: або він підвищувальний, або – знижувальний.

З принципу дії витікає, що трансформатор може працювати лише в мережі змінного струму. При ввімкненні первинної обмотки в мережу постійного струму, магнітний потік змінюватись не буде ($d\phi/dt = 0$). Отже в обмотках не буде створюватись ЕРС, як наслідок у первинній обмотці буде протікати значний струм, тому що при відсутності ЕРС він

буде обмежуватись тільки відносно незначним активним опором обмотки. Значний струм може викликати недопустиме перегрівання обмотки і навіть її перегорання.

3. Будова трансформаторів

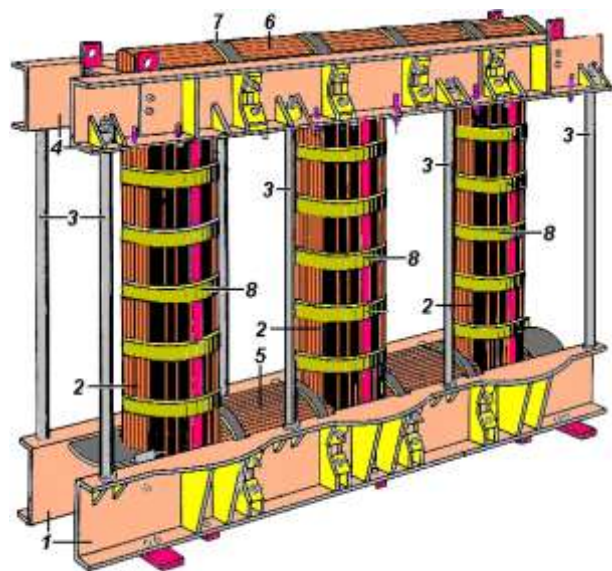


Рисунок 3 – Кістяк трифазного силового трансформатора

називаються кістяком. На (рис. 3) поданий кістяк трифазного трансформатора. Кістяк виконує подвійну функцію: по-перше, він складає магнітне коло, по якому замикається магнітний потік, а по-друге, на ньому кріпляться обмотки, відводи, перемикачі та також інші деталі і вузли, тобто він є конструктивною основою трансформатора.

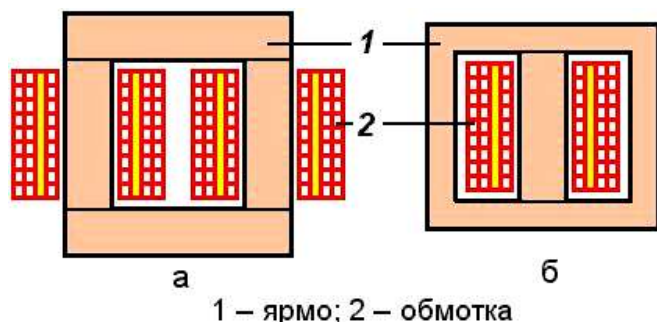


Рисунок 4 – Стрижнева (а) і броньова (б) конструкції магнітопроводу

Як уже зазначалось, магнітопровід складається зі стрижнів 2, на яких розміщуються обмотки, і ярем (нижнього 5 та верхнього 6), що з'єднують стрижні. Магнітна система має шихтовану конструкцію, тобто набирається з окремих пластин високоякісної електротехнічної сталі товщиною (0,28 – 0,35) мм (у сучасних конструкціях і менше), ізольованих одна від одної ізоляційною плівкою. Така конструкція найбільш технологічна і дозволяє суттєво знизити втрати від вихрових струмів, а якість сталі – втрати від гістерезису, що, в кінцевому результаті, підвищує ККД трансформатора.

У сучасних силових трансформаторах, використовується конструкція магнітних систем із косими та з комбінованими (частково прямі стики, частково косі) стиками при шихтуванні, що дозволяє знизити втрати в стиках від анізотропії сталі. Стрижні системи опресовуються й стягуються склобандажами 8, а ярма – балками (нижніми 1 та верхніми 4), що з'єднуються шпильками 3 і металевими напівбандажами 7.

В залежності від взаємного розташування стрижнів, ярем і обмоток магнітопроводу поділяються на стрижневі (рис. 4, а), броньові (рис. 4, б) та бронестрижневі. У стрижневій конструкції ярма 1 обхвачують тільки торцеві поверхні обмоток 2, і в броньовій – ярма розташовуються так, що обхвачують обмотки і з торців, і з боків, буцім, закриваючи їх бронею. У бронестрижневій конструкції має місце поєднання броньової та

стрижневої конструкції, тобто обмотка обхватується ярмами тільки на половину. Бронестрижневої конструкції був би магнітопровід (рис. 4, а) якби обмотки розташовувались тільки на одному стрижні. Найчастіше бронестрижнева конструкція використовується у трансформаторах великої потужності для зниження висоти магнітної системи, що забезпечує вписування такого трансформатора у залізничний габарит.

Крім шихтованої конструкції магнітні системи можуть виконуватися витими, тобто навиватися зі стрічки електротехнічної сталі безпосередньо в обмотку на спеціальному обладнанні. Частіше (для малопотужних трансформаторів) після навивання магнітопроводи розрізаються для подальшого насаджування обмоток, в цьому випадку вони називаються *стиковими*.

Обмотки. Елементами електричних кіл трансформатора є обмотки. Обмотки трансформаторів виконуються з мідних або алюмінієвих обмоткових дротів круглого чи прямокутного перерізу, ізолюваних *лаковим покриттям, бавовняною пряжею або кабельним папером*. Як правило, обмотки намотуються на *паперово-бакелітові* циліндри і насаджуються концентрично одна другій на стрижень осердя, при цьому обмотка НН розміщується безпосередньо на стрижень, а обмотка ВН – на ній, зовні. Таке розміщення дозволяє суттєво знизити ізоляційні проміжки між стрижнями та обмотками, а отже і габарити трансформатора в цілому. Крім *концентричних обмоток* можуть використовуватися обмотки, *що чергуються*. В таких обмотках котушки ВН чергуються з котушками НН по висоті стрижня, що дозволяє знизити магнітне розсіювання, але суттєво ускладнює ізоляцію.

В силових трансформаторах переважно використовуються концентричні обмотки, які за характером намотування можна поділити на *циліндричні* (рис.5, а), *безперервні* (рис.5, б) та *гвинтові* (рис.5, в).

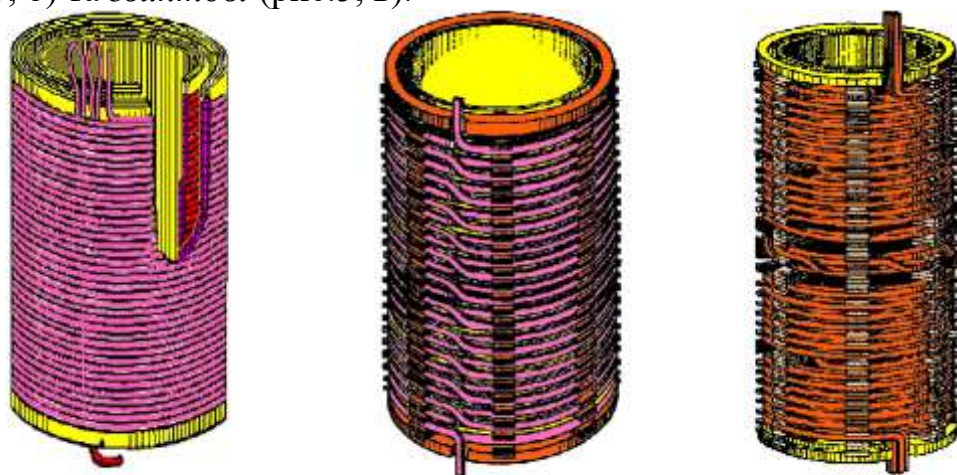


Рисунок 5 – Циліндрична (а), безперервна (б) і гвинтова (в) обмотки трансформаторів

В залежності від номінального струму та класу напруги, циліндричні обмотки трансформаторів поділяються на *одношарові, двошарові та багатшарові*. Ці та безперервні обмотки можуть використовуватись і як обмотки ВН, і як НН, а гвинтові – лише як обмотки НН із значними струмами.

У технологічному відношенні найпростішими, а отже, і найдешевшими, є циліндричні обмотки, що намотуються на паперово-бакелітові циліндри в один або кілька паралельних провідників. Використання таких обмоток обмежується їх гіршими електродинамічними властивостями.

Безперервна обмотка виконується у вигляді окремих сполучених між собою котушок. Завдяки каналам між котушками, така обмотка добре охолоджується, але

необхідність перекладання половини котушок для забезпечення безперервності значно ускладнює її виготовлення.

Гвинтова обмотка навивається у вигляді гвинтової лінії з витків, складених із кількох (від 4 до 20) паралельних провідників прямокутного перерізу одним, двома чи більше ходами. Значна кількість паралельних провідників, концентрично розміщених відносно один одного, вимагає їх перекладання (виконання *транспозиції*) при намотуванні. Перекладання дозволяє вирівняти довжину окремого провідника і створити для кожного з них однакові умови щодо поля розсіювання, але утрудняє процес виготовлення і підвищує собівартість гвинтової обмотки.

Допоміжні елементи. За способом охолодження силові трансформатори поділяються на сухі (охолоджуються *навколишнім повітрям*) та масляні (рис. 6) (охолоджуються *трансформаторним маслом*).

В останніх активна частина поміщається в бак, заповнений трансформаторним маслом. Трансформаторне масло, маючи кращу теплопровідність ніж повітря, служить для відводу теплоти від активної частини трансформатора. Крім цього, трансформаторне масло, як гарний діелектрик, забезпечує високу електричну міцність, а отже, і більш надійну роботу трансформатора при менших габаритах. У трансформаторів незначної потужності до (20 – 30) кВ*А застосовуються баки із гладкими стінками. У більш потужних – трубчаті чи гофровані баки, або бак **1** із *навісними радіаторами 5*. Навісні радіатори збільшують поверхню охолодження і дозволяють знизити габарити трансформатора. На *кришці* бака розташовуються:

– *виводи ВН 12, НН 14, та нейтралі 15* для з'єднання відводами **17** і **20** обмоток **22** трансформатора з мережею та навантаженням;

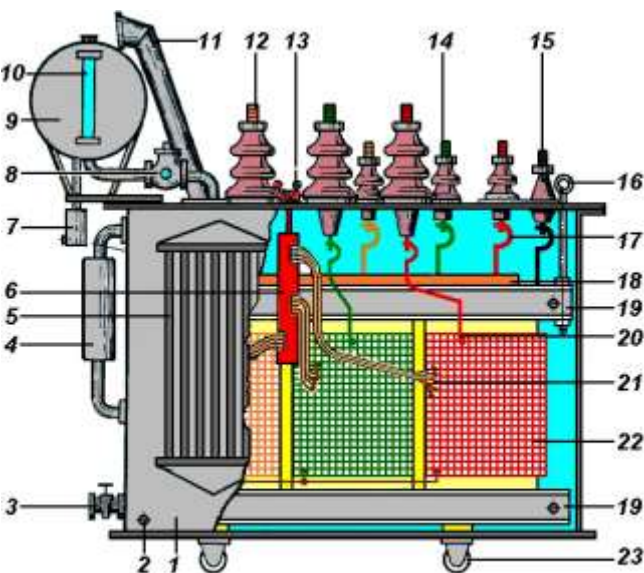


Рисунок 6 – Силовий масляний трансформатор

– *ручний привод 13 перемикача 6*, призначеного для ступінчатої зміни числа витків, як правило, в обмотці ВН, де виконуються для цього відводи **21**;

– *розширник 9*, ним компенсується об'єм масла при зміні температури і зменшується площа дотику масла до повітря;

– *масловказівник 10* – скляна трубка, що з'єднана обома кінцями з розширником і указує на рівень трансформаторного масла в розширнику при фіксованій температурі;

– *повітроосушник 7* – заповнена *сілікагелем*, через який масло розширника сполучується з навколишнім повітрям, ємність;

– *газове реле 8*, призначене для подачі сигналу й відмикання трансформатора від

мережі при аварійних режимах, що супроводжуються виділенням газу з масла; із цією метою газове реле має дві пари контактів, розміщених в спеціальних поплавках;

– *викидна труба 11* забезпечує захист трансформаторів, потужність яких *1000 кВ*А* і більше, від розривання бака при зростанні тиску в середині бака у аварійних випадках; із цією метою викидна труба закінчується *фланцем* зі скляним *диском*, який і лопається при зростанні тиску;

– *рим-болти 16* для піднімання активної частини, які найчастіше сполучуються шпильками з ярмовими балками *19*, що стягують ярмо *18*;

– *термосифонний фільтр 4* забезпечує постійне очищення масла від вологи й уявляє заповнений силікагелем циліндр, сполучений з верхньою та нижньою частинами бака, у якій розташовуються також *кран* для заливання під тиском масла *3* і *болт заземлення 2*;

– *візок 23* прикріплюється до *дна* бака і забезпечує переміщення трансформатора в межах *підстанції*.

Властивості трансформатора визначаються його *номінальними параметрами*:

– *номінальною (лінійною) напругою первинної обмотки* $U_{1ном}$, *В* або *кВ*;

– *номінальною (лінійною) напругою вторинної обмотки* (номінальною вторинною напругою є напруга при відімкненому навантаженні, тобто, при НХ) $U_{2ном}$, *В* або *кВ*;

– *номінальними (лінійними) струмами* у первинній $I_{1ном}$ і вторинній $I_{2ном}$ обмотках, *А*;

– *номінальною повною потужністю*, що є однаковою для обох обмоток $S_{ном}$, *кВ*А* (для однофазного трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} * I_{1ном} = U_{2ном} * I_{2ном}$, для трифазного – $S_{ном} = \sqrt{3} * U_{1ном} * I_{1ном} = \sqrt{3} * U_{2ном} * I_{2ном} = 3U_{1ф} * I_{1ф} = 3 * U_{2ф} * I_{2ф}$).

Номінальні лінійні струми в паспорті трансформатора найчастіше не указані, тому для трифазного трансформатора вони визначаються, як:

$$I_{1ном} = S_{ном} / (\sqrt{3} * U_{1ном}); I_{2ном} = S_{ном} / (\sqrt{3} * U_{2ном}). \quad (6)$$

Кожен трансформатор може вмикатися лише до мережі змінного струму визначеної частоти. В Україні трансформатори загального призначення розраховані на частоту $\square = 50$ *Гц* (в деяких країнах $\square\square\square 60$ *Гц*), в пристроях автоматики і зв'язку можуть застосовувати трансформатори розраховані на частоти 50, 400 або 1000 *Гц*.

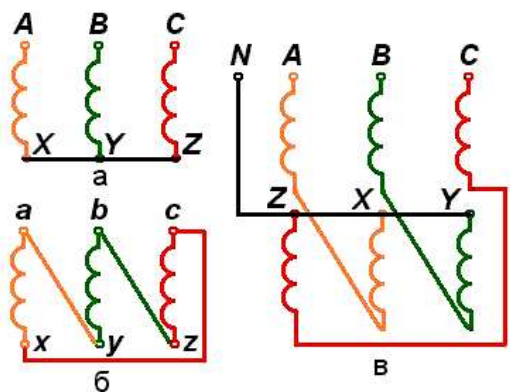


Рисунок 7 – Схеми сполучення обмоток трифазних трансформаторів зірка (а), трикутник (б) та зигзаг (в)

4. Поняття про групи з'єднань обмоток трансформатора

Затискачі обмоток трансформаторів позначають літерами латинського алфавіту: початки обмоток першими, а кінці останніми; при цьому, обмотка ВН позначається великими літерами *A, B, C, X, Y, Z*, а обмотка НН – малими *a, b, c, x, y, z* (рис. 7).

Між собою обмотки фаз трифазних трансформаторів сполучуються за такими схемами: “зірка” (рис. 7, а); “зірка з нейтральним виводом” (вивід *N* виконується від нульової точки сполучення – *x, y, z*; “трикутник” (рис. 7, б) та “зигзаг” (як правило, з нейтральним виводом) (рис. 7, в).

Зірка (позначається літерою *Y*), згідно стандарту – це сполучення, коли кінці обмоток з'єднуються в загальну точку – “нуль”. При сполученні в зірку лінійні напруги більші від фазних у $\sqrt{3}$ разів, а лінійні струми рівні фазним. Слід нагадати, що лінійні напруги – це напруги між фазами – U_{AB} ; U_{BC} ; U_{CA} , а фазні – між початком та кінцем фази – U_{Ax} ; U_{By} ; U_{Cz} .

Трикутник (позначається літерою **Д**), згідно стандарту – це коли початок попередньої фази з'єднується з кінцем наступної при сполученні обмоток НН (рис. 7, б) і кінець попередньої з початком наступної при сполученні обмоток ВН. Якщо в трикутник сполучені обидві обмотки трансформатора, то обмотка НН сполучується так, як і ВН. При сполученні в трикутник лінійні та фазні напруги рівні, а лінійні струми більші від фазних в $\sqrt{3}$ разів. Нагадаємо, що лінійні струми – це струми, які підтікають до точок **a, b, c**, а фазні – які з цих точок витікають (рис. 7, б).

Зигзаг (позначається літерою **З**) – це схема, при сполученні за якою обмотка фази ділиться на дві частини, кожна з них розміщується на різних стрижнях, між собою ці частини вмикаються зустрічно, тому напруга фази виявляється в $\sqrt{3}$ разів більше напруги кожної частини (рис. 7, в). Зигзаг називається рівноплечовим, якщо частини обмотки фази, що розміщені на різних стрижнях, мають рівну кількість витків; і не рівноплечовим – якщо частини обмотки фази не однакові.

Схеми сполучення обмоток трансформаторів позначаються як дріб (**У/У**, **У/Д** тощо). Чисельник цього дробу позначає схему сполучення обмотки ВН, а знаменник – обмотки НН. При виборі схеми з'єднання обмоток враховується ціла низка обставин. При значних напругах перевага віддається схемі сполучення зірка з заземленням нульової точки, що дозволяє знизити напругу проводів лінії електропередач відносно землі в $\sqrt{3}$ разів і зменшити вартість ізоляції. Обмотки НН сполучуються в зірку і виводиться нульовий вивід (позначається **У_н**) у тому випадку, коли необхідно живити змішане навантаження, наприклад освітлення, яке вмикається між фазою і нулем, та трифазні двигуни, що звичайно вмикаються на лінійну напругу трьох фаз.

Якщо напруга обмотки НН вище 400 В, перевага віддається схемі сполучення трикутник, так як це покращує умови роботи трансформатора при несиметричному навантаженні і знижує вплив на його роботу несинусоїдальності напруги.

Схема сполучення зигзаг використовується в спеціальних трансформаторах, які працюють із напівпровідниковими випрямлячами, або інверторами. Слід зазначити, що така схема вимагає в $(2/\sqrt{3})$ разів більших затрат обмоткового дроту, в порівнянні зі схемою зірка, але вони дозволяють виключити постійну складову магнітного потоку, що виникає у магнітопроводі трансформатора при його роботі з випрямлячем або інвертором.

В паспорті трансформатора після схеми сполучення обмоток указується через дефіс цифра, яка позначає групу сполучення (**У/У-0**; **У/Д-11** тощо). Під групою сполучення обмоток слід розуміти кут (множення номера групи на 30°), на який лінійний вектор ЕРС обмотки НН **Е_{НН}**, відстає від однойменного вектора обмотки ВН **Е_{ВН}**.

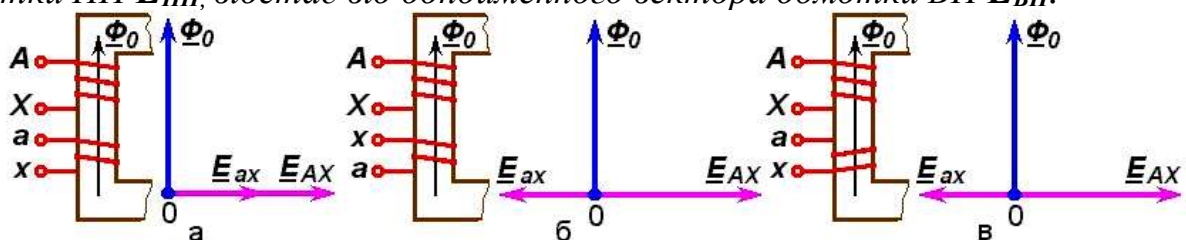


Рисунок 8 – Позначення затискачів та векторні діаграми потоків і ЕРС обмоток трансформатора при однаковому (а, б) та різному (в) напрямі їх намотування

У однофазного трансформатора фазні ЕРС будуть одночасно і лінійними, тому ЕРС обох обмоток або співпадають по фазі, якщо обмотки намотані однаково і мають однакове найменування затискачів (рис. 8, а), або будуть зсунуті на 180° при не однойменному маркуванні затискачів обмоток (рис. 8, б) чи різному намотуванні

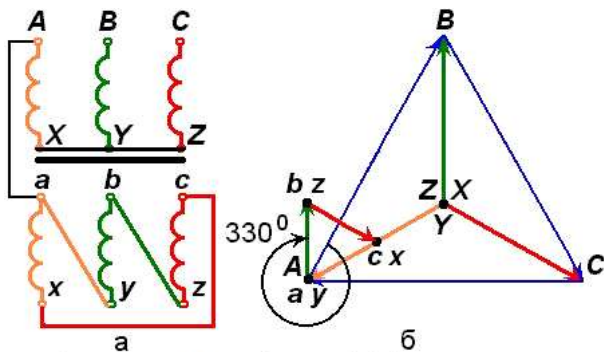


Рисунок 11 – Схема (а) і векторна діаграма (б) групи сполучення У/Д-11

обмоток (рис. 8, в). Згідно з цим для однофазних трансформаторів мають місце тільки дві групи сполучення – нульова, якій відповідає кут у 0° і шоста з кутом у 180° . Для трифазних трансформаторів, на відміну від однофазних, можна отримати (змінюючи не лише напрям намотування обмоток, чи маркування затискачів, а і схеми їх сполучення) 12 різних груп: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 та 11. При цьому парні групи будуть при однакових схемах сполучення (У/У, Д/Д), а непарні при різних – (У/Д, Д/У).

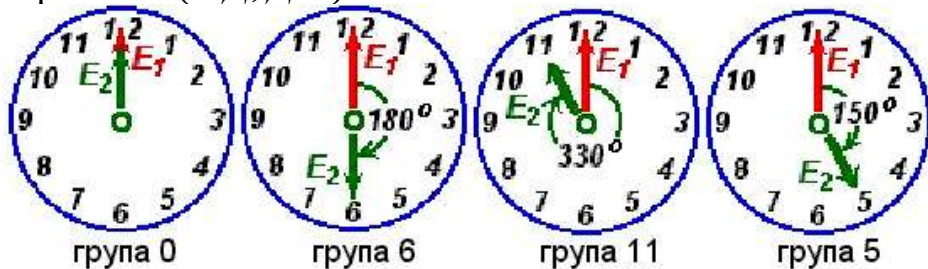


Рисунок 9 – Позначення груп сполучення обмоток трансформатора використанням годинникового циферблата

Для позначення групи використовується циферблат стрілковатого годинника (рис. 9): велика стрілка вважається лінійним вектором обмотки ВН, вона ставиться на цифру 12, тоді номер групи указує мала стрілка – лінійний вектор ЕРС обмотки НН.

Щоб визначити яку групу сполучення яку має трифазний трансформатор при заданих схемах сполучення, необхідно побудувати векторно-потенціальну діаграму ЕРС його обмоток. Для взаємної орієнтації векторів ЕРС обмоток ВН та НН два будь-які затискачі цих обмоток (наприклад, А та а) вважаються електрично з'єднаними. При дослідному визначенні групи їх необхідно з'єднати провідником для електричного зв'язку між обмотками, інакше неможливо проводити необхідні вимірювання, адже обмотки ВН та НН мають тільки магнітний зв'язок.

На (рис. 10) подана схема сполучення та векторно-потенціальна діаграма групи У/У-0, на якій, у відповідності до з'єднаних затискачів А та а, точки А і а суміщені. Враховуючи, що фазні обмотки (АХ та ах; ВУ та by; СZ та cz) розташовані по дві на одному із стрижнів осердя трансформатора, то їх відповідні фазні вектори E_{AX} і E_{ax} співпадають, а E_{BY} і E_{by} та E_{CZ} і E_{cz} направлені паралельно. Таким чином нульова точка х; у; z обмоток НН розташовується на векторі E_{AX} , а вектор E_{by} , що відкладається з цієї точки і паралельний вектору E_{BY} закінчується на лінійному векторі E_{BA} , тому лінійний вектор E_{ba} співпадає з лінійним вектором E_{BA} (кут між ними рівний 0°), а отже це нульова група.

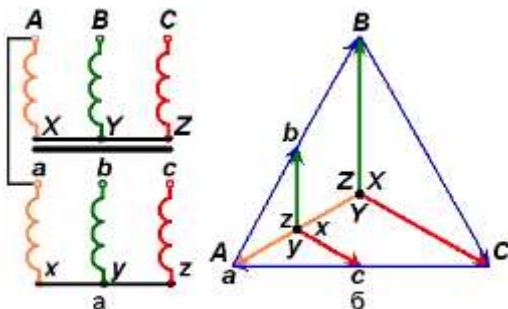


Рисунок 10 – Схема (а) і векторна діаграма (б) групи У/У-0

На (рис. 11) зображені схема сполучення У/Д-11 та векторно-потенціальна діаграма, що відповідає одинадцятій групі. Затискачі А і а обмоток ВН та НН з'єднані – на діаграмі це точка А, а, та у (дві останні з'єднані в трикутнику обмотки НН). Вектор E_{by} відкладається паралельно фазному вектору E_{BY} , тому що обмотки ВУ та by розташовані на одному стрижні і мають однаковий напрям намотування та однакове

найменування затискачів, відповідно до (рис. 11, а). Таким чином, лінійний вектор E_{ab} (він одночасно є і фазним вектором E_{by}) відстає від однойменного вектора E_{AB} на кут 330° , а отже, це одинадцята група.

Як уже відзначалось, зміна назви затискачів обмотки, чи напрямку намотування, призведе до повороту фазного вектора ЕРС даної обмотки на кут 180° , а отже, щоб з нульової групи отримати шосту, а з одинадцятої – п'яту, необхідно змінити назву затискачів обмотки НН a на x , b на y , c на z і навпаки (рис.12).

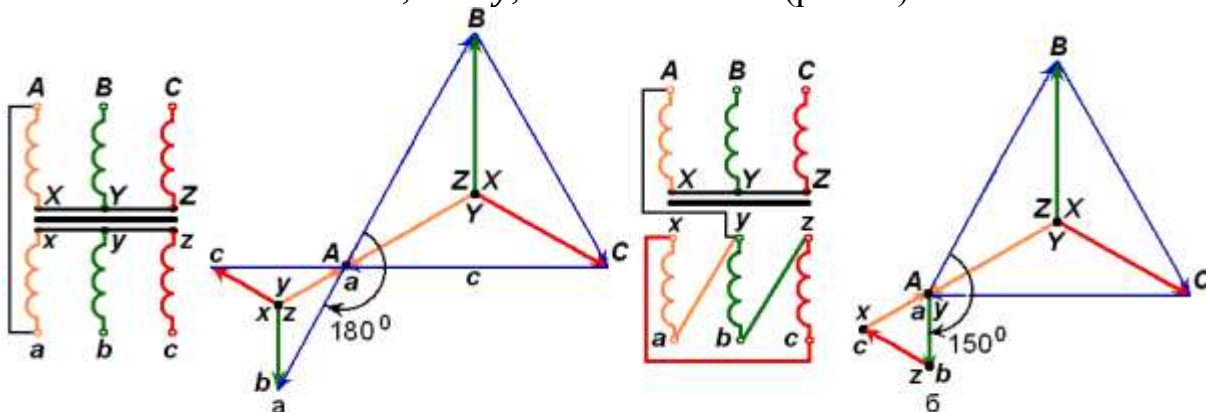


Рисунок 12 – Схеми і векторні діаграми груп сполучення $Y/Y-6$ (а) та $Y/D-5$ (б)

Розглянуті чотири групи сполучення можна отримати залишаючи обмотки НН та ВН кожної фази на “своєму” стрижні, тому ці групи називаються *основними*. Щоб забезпечити отримання основних груп при схемах сполучення Y/D та D/Y , обмотки НН та ВН, сполучені за трикутником, згідно стандарту з'єднуються не однаково: в обмотці НН – a з y , b з z , c з x (рис. 11, а та рис. 12, б); в обмотці ВН – A з Z , B з X , C з Y (рис. 13, б).

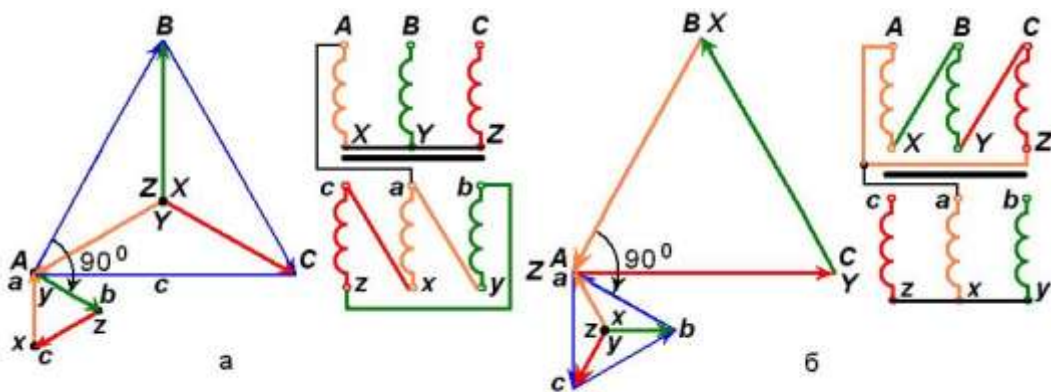


Рисунок 13 – Схеми і векторні діаграми груп сполучення $Y/D-3$ (а) та $D/Y-3$ (б)

Якщо ж обмотки НН та ВН однієї фази розташовувати на різних стрижнях, то можна отримати решту вісім груп, які називаються *похідними* (похідні групи на практиці не використовуються і мають лише теоретичне значення). Розглянемо приклади побудови похідної групи. Наприклад, необхідно з'єднати обмотки трансформатора за третьою групою. Так як група 3 непарна, то схеми сполучення обмоток ВН та НН повинні бути різними, тобто $Y/D-3$, або $D/Y-3$. Щоб провести з'єднання затискачів обмоток за $Y/D-3$, спершу будується векторно-потенціальна діаграма (рис. 2.35, а), на якій вектор E_{ab} відкладається під кутом $3 \times 30^\circ = 90^\circ$ до вектора E_{AB} , тобто трикутник abc повертається за годинником відносно трикутника ABC на кут 90° . В результаті такого повороту фазні вектори ЕРС обмотки НН стали паралельними фазним векторам обмотки ВН інших фаз: так вектор E_{ax} паралельний вектору E_{By} ; $E_{by} - E_{Cz}$; $E_{cz} - E_{Ax}$. У відповідності до цього слід позначити і з'єднати затискачі обмотки НН. Аналогічно

будуються і векторно-потенціальної діаграми та з'єднуються обмотки за схеми $D/Y-3$ (рис. 13, б).

Основні групи мають перевагу перед похідними, так як передбачають однойменне маркування затискачів обмоток, що розташовані на одному стрижні, а це, а свою чергу, зменшує вірогідність помилки при з'єднанні схеми. Слід також відзначити, що на групу сполучення обмоток зважають лише при паралельній роботі трансформаторів.

Тема 6. Асинхронні електродвигуни

План

1. Принцип дії асинхронного двигуна
2. Режими роботи асинхронної машини
3. Конструкція асинхронних двигунів.

1. Принцип дії асинхронного двигуна

Широке застосування асинхронних машин зумовило і значне конструктивне розмаїття цих машин (особливо тих, які використовуються як двигуни) в плані потужності, номінальної напруги, числа фаз, конструкції тощо.

Однак, найбільш поширеними є трифазні двигуни, що виготовляються для масового використання з номінальною напругою 220/380 В і номінальними потужностями від 0,06 до 400 кВт.

Принцип дії асинхронного двигуна, оснований на взаємодії електричного струму з магнітним полем, може бути поясненим за допомогою макета, який складається з електропровідного диска та підковоподібного магніту (рис. 1, а).

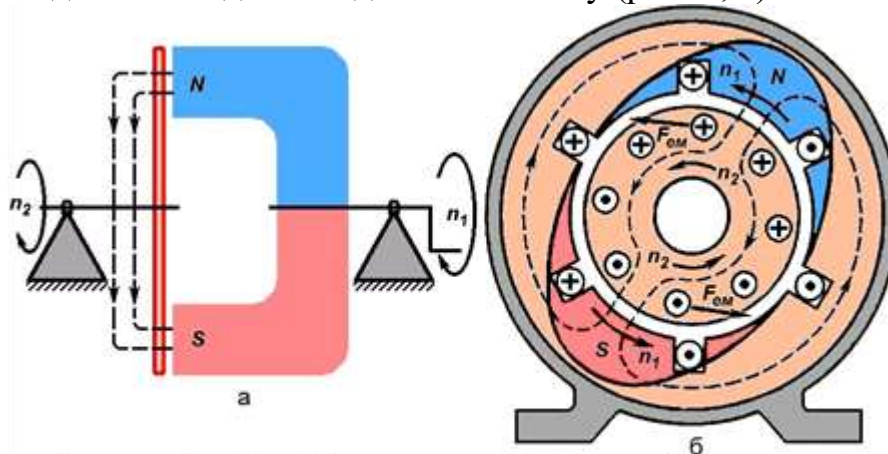


Рисунок 1 – Макет (а) та електромагнітна схема (б) до пояснення принципу дії асинхронного двигуна

Диск і магніт закріплені в підшипниках так, що можуть вільно обертатись. Якщо обертати підковоподібний магніт з частотою обертання n_1 , то його поле, перетинаючи електропровідний диск, індукує в ньому ЕРС та струм. Взаємодія цього струму з полем приведе до появи електромагнітних сил, які будуть обертати диск в тому ж напрямі, в якому обертається магніт, але з меншою частотою обертання n_2 . Дійсно, як тільки частота обертання n_2 стає, з якоїсь причини, рівною n_1 – диск обертається синхронно з магнітом, магнітне поле перестає індукувати в диску ЕРС і струми (отже, зникають електромагнітні сили, що обертають диск), тому останній почне гальмуватись і n_2 стане меншою від n_1 .

Визначаючи напрям обертання ротора асинхронного двигуна, користуються правилами правої (визначається напрям ЕРС і, відповідно, струму) та лівої (визначається напрям електромагнітних сил F_{em}) руки. При цьому, застосовуючи правило правої руки, слід пам'ятати, що в ньому йдеться про напрям руху провідника в магнітному полі, а в даному випадку рухається поле, тому великий палець слід направляти саме проти напрямку руху поля. Так на (рис. 1, б) магнітне поле NS обертається проти годинника,

отже провідник, по відношенню до поля, рухається за напрямом годинника (на рисунку не показано).

В реальному асинхронному двигуні, електромагнітна схема якого наведена на (рис. 1, б), кругове обертове поле створює трифазна обмотка статора при живленні від мережі змінного струму. Це поле наводить ЕРС та струми в замкненій обмотці ротора, що й приводить до його обертання в напрямі дії електромагнітних сил F_{em} , які створюють електромагнітний момент.

Важливою величиною, що характеризує роботу асинхронного двигуна, є ковзання – різниця між частотами обертання магнітного поля n_1 і ротора n_2 , виражена у відносних одиницях:

$$s = (n_1 - n_2)/n_1. \quad (1)$$

Досить часто ковзання асинхронної машини виражається у відсотках:

$$s = (n_1 - n_2) \cdot 100 / n_1. \quad (2)$$

Від ковзання суттєво залежить робота асинхронної машини та її режими.

2. Режими роботи асинхронної машини

Згідно з принципом оборотності, асинхронна машина може працювати в режимі двигуна та в режимі генератора. Крім цього, як і у машин постійного струму, можливий також і гальмівний режим роботи. Уявимо, що вал асинхронної машини з'єднаний з валом пристрою, момент якого M_2 (M_1) може змінюватись як за величиною, так і за напрямом.

Режим двигуна. В цьому режимі асинхронна машина призначена для перетворення електричної потужності, що поступає з мережі, в механічну. З мережі змінного струму двигун споживає як активну P_1 , так і реактивну Q_1 потужність, остання необхідна для створення обмоткою статора обертового магнітного поля. Активна електрична потужність частково перетворюється у механічну P_2 і віддається пристрою (момент якого, направлений проти моменту M_{em} , що розвиває двигун), а частково – у втрати, розсіюючись і нагріваючи активні частини машини (рис. 2).

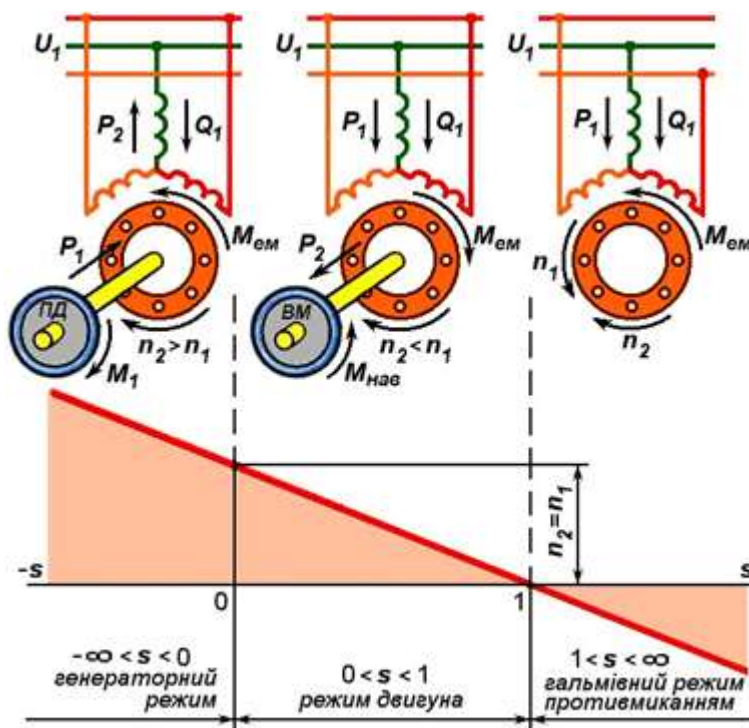


Рисунок 2 – Режими роботи асинхронної машини

В момент пуску, під впливом інерційності, ротор якийсь час лишається нерухомим ($n_2 = 0$), тому ковзання s дорівнює одиниці. Під час розгону ковзання знижується до нуля при ідеальному НХ ($n_2 = n_1$). Це можливо, якщо пристрій на валу не гальмує, а навпаки, моментом M_1 обертає ротор.

При номінальному навантаженні ковзання називається *номінальним ковзанням* $s_{ном}$ і змінюється від 0,01 до 0,08 тобто (1 – 8) %. Тут менші значення відносять до більш потужних двигунів, а більші – до двигунів меншої потужності.

Перетворивши вираз (1), можна отримати формулу для визначення асинхронної частоти обертання з якою обертається ротор, об/хв.:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (3)$$

Генераторний режим. Якщо вал машини обертати моментом M_1 у напрямі обертання магнітного поля з частотою обертання n_2 , більшою від частоти n_1 , то машина перейде в генераторний режим роботи ($n_2 > n_1$). При цьому механічна потужність P_1 , що поступає на вал машини перетворюється частково в активну електричну потужність P_2 , що віддається в мережу, а частково, у втрати. З мережі, як і у режимі двигуна, буде споживатись реактивна електрична потужність Q_1 , необхідна для створення магнітного поля, тому що сам асинхронний генератор такої потужності не виробляє.

Так як ротор обертається швидше від магнітного поля, то ковзання машини в цьому режимі буде від'ємним і змінюватиметься від 0 до $-\infty$. Зміна знаку ковзання приводить до зміни напрямку ЕРС в обмотці ротора. Дійсно тепер ротор обертаючись випереджає поле, тобто, перетинається ним в іншому напрямі. Змінюється і напрям струму та електромагнітного моменту, який стає гальмівним і протидіє моменту привідного двигуна M_1 .

Гальмівний режим. Такий режим може мати місце у двох випадках. По-перше, якщо у двигуна, що працює, провести реверсування (помінявши місцями, наприклад, фази A і C), то магнітне поле почне обертатися в іншому напрямі, а ротор, по інерції, в тому ж, що й обертався. Електромагнітний момент $M_{ем}$ із рушійного стане гальмівним, а

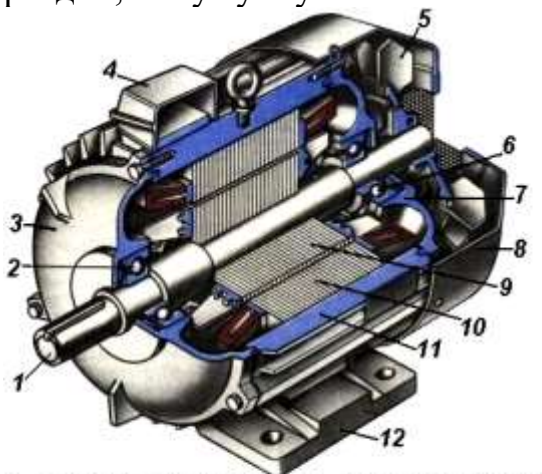
ковзання більшим від одиниці, тому що ротор і поле обертаються в різні боки. По-друге, якщо на валу двигуна діє активний гальмівний момент (який, наприклад, розвиває вантаж через барабан підйомника) більший, ніж момент пусковий, що його розвиває двигун, то в цьому випадку ротор під дією цього моменту також буде обертатись проти обертання поля.

В обох випадках із мережі споживається, як і у режимі двигуна, активна і реактивна потужність (для створення магнітного поля), при цьому активна потужність, частково, затрачується на компенсацію механічної потужності ротора, що обертається, а частково на втрати, як і у попередніх режимах.

Підсумовуючи викладене про режими роботи асинхронної машини, можна стверджувати, що у будь-якому режимі є нерівність частот обертання ротора і поля, тобто, наявність ковзання, адже тільки в цьому випадку кругове обертове магнітне поле створює в роторі ЕРС і на ротор діє електромагнітний момент. При цьому кожному режимові роботи асинхронної машини відповідає визначений діапазон зміни ковзання, а відповідно і частоти обертання ротора (3).

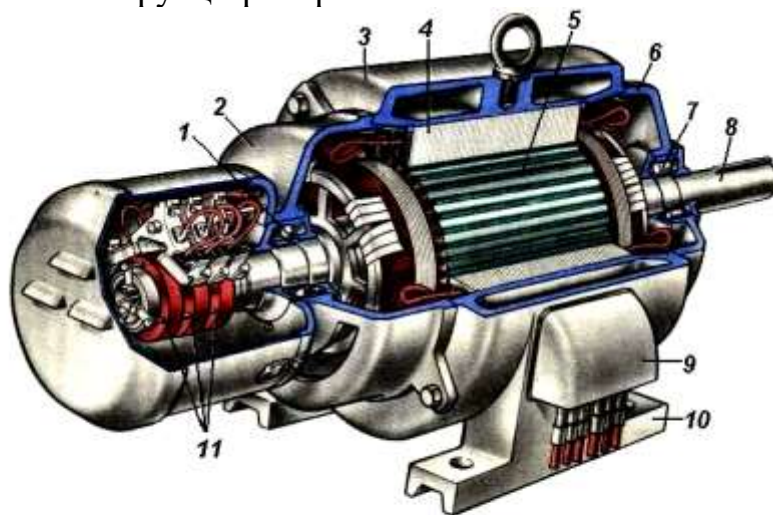
3. Конструкція асинхронних двигунів

За конструкцією асинхронні двигуни поділяють на два види: двигуни з короткозамкнутою обмоткою ротора (з короткозамкненим ротором) (рис. 3) та з фазною обмоткою ротора (з фазним ротором) (рис. 5). Слід зазначити, що статори цих двигунів, практично, не відрізняються і їх конструкція розглядалась у попередньому розділі, тому тут зупинимось лише на конструкції роторів.



1 – вал; 2, 6 – підшипник; 3, 7 – підшипниковий щит;
4 – коробка відводів; 5 – вентилятор; 8 – кожух
вентилятора; 9 – осердя ротора із замкнутою
обмоткою; 10 – осердя статора з обмоткою;
11 – зовнішня оболонка; 12 – лапи кріплення

Рисунок 3 – Конструкція трифазного
асинхронного двигуна з короткозамкненим
ротором



1, 7 – підшипники; 2, 6 – підшипникові щити; 3 – корпус; 4 – осердя
статора з обмоткою; 5 – осердя ротора з фазною обмоткою; 8 – вал;
9 – коробка відводів; 10 – лапи; 11 – контактні кільця

Рисунок 5 – Побудова асинхронного двигуна з фазним
ротором

Ротор двигуна з короткозамкнутою обмоткою складається з вала, на який насаджено пакет заліза з пазами, в яких розміщується замкнена коротко обмотка. Така обмотка, вона ще називається “біляче колесо”, уявляє собою низку металевих (алюмінієвих, бронзових чи мідних) стрижнів, розташованих в пазах осердя ротора, і замкнених з обох боків замикаючими кільцями (рис. 4, а). Осердя ротора набирається із пластин, які штампуються одночасно з пластинами осердя статора, але не покриваються ізоляційним лаком, як пластини статора, а мають лише оксидну плівку, яка є достатньою ізоляцією, що обмежує вихрові струми. Величина цих струмів у робочому режимі незначна, тому що частота перемagnetичування осердя ротора мала.

Замкнена коротко обмотка ротора у більшості двигунів виконується шляхом заливки пазів осердя ротора розплавленим алюмінієвим сплавом (рис. 4, б).

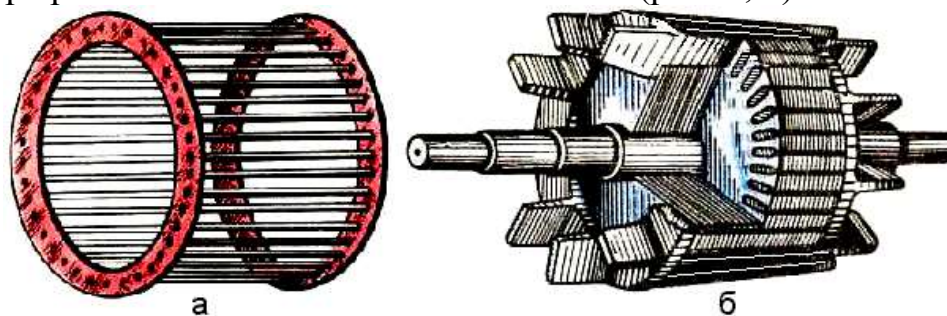


Рисунок 4 — Обмотка типу "біляче колесо" (а) та ротор асинхронного двигуна з обмоткою, виконаною методом лиття під тиском (б)

При цьому, у деяких двигунів, одночасно на замикаючих кільцях відливаються і вентиляційні лопатки. Принципова електрична схема ввімкнення такого двигуна до мережі зображена на (рис. 6, а).

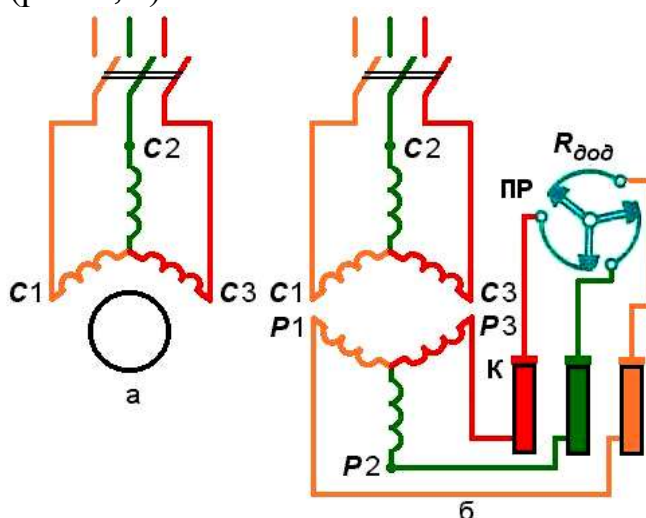
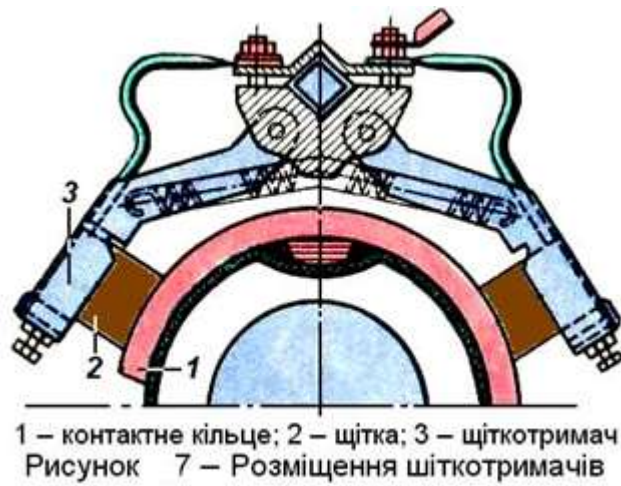


Рисунок 6 — Електричні схеми ввімкнення в мережу трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим (а) та фазним ротором (б)

Як і ротор двигуна з замкнутою коротко обмоткою, фазний ротор має вал з осердям, в пази якого вкладається обмотка. Обмотка такого ротора виконується, по аналогії з обмоткою статора, трифазною сполученою в зірку, а її кінці виведені на три контактних кільця. Тому такий двигун ще називають *асинхронним двигуном з контактними кільцями*. Контактні кільця (рис. 7) ізолюються одне від одного і від стрижня, на якому жорстко закріплюються. Для здійснення електричного контакту з обмоткою ротора, який обертається, на кожне контактне кільце **1** накладаються, як правило, дві щітки **2**, що розташовані у щіткотримачах **3**. Кожен щіткотримач має пружину, яка забезпечує необхідний тиск щітки на контактне кільце. Самі щіткотримачі закріплюються на передньому підшипниковому щиті двигуна і закриваються кожухом.



Асинхронні двигуни з фазним ротором (рис. 5) конструктивно більш складні, ніж двигуни з замкненим коротко ротором, а тому і менш надійні в роботі, але вони мають кращі регульовальні та пускові властивості завдяки можливості ввімкнення в коло ротора через контактні кільця **К** та перемикач **ПР** додаткових опорів **R_{dod}** (рис.6, б).

На корпусі асинхронного двигуна закріплюється металева табличка, на якій вказуються тип двигуна, завод, на якому він виготовлений, рік виготовлення та номінальні дані (корисна механічна потужність на валу, напруга і струм через дріб при сполученні трикутником та зіркою, коефіцієнт потужності, частота обертання, ККД, маса тощо).

Тема 7. Електропривід, апаратура керування та захисту

План

1. Електропривід. Класифікація.
2. Призначення та класифікація електричних апаратів керування та захисту.
3. Комутаційна апаратура ручного керування.
4. Апаратура та пристрої автоматичного керування.

1. Електропривід. Класифікація.

Сучасний електропривід — це сукупність електромашин, апаратів і систем керування ними. Він є основним споживачем електричної енергії (до 60 %) і головним джерелом механічної енергії в промисловості.

Найефективнішим способом економії енергії на всіх виробництвах, де потрібне регулювання продуктивності механізмів на базі електродвигунів змінного струму є застосування регульованого електроприводу змінного струму. Впровадження такого електроприводу на механізмах з квадратичним навантаженням (насосів, вентиляторів, повітродувки) дозволяє відмовитися від дроселювання і досягти економії електроенергії в 30-70 %.

Класифікація електроприводів зазвичай проводиться по виду руху і керованості, роду електричного і механічного передавальних пристроїв, способом передачі механічної енергії виконавчим органам.

По виду руху розрізняються електроприводи обертального й поступального односпрямованого і реверсивного руху, а також електроприводи зворотно-поступального руху.

За принципом регулювання швидкості та положення виконавчого органу електропривод може бути:

- Нерегульований і регульований за швидкістю;
- Стежить (за допомогою електроприводу відтворюється переміщення виконавчого органу відповідно до довільно змінюються задає сигналом);
- Програмно-керований (електропривод забезпечує переміщення виконавчого органу відповідно до заданої програми);
- Адаптивний (електропривод автоматично забезпечує оптимальний режим руху виконавчого органу при зміні умов його роботи);
- Позиційний (електропривод забезпечує регулювання положення виконавчого органу робочої машини).

За родом механічного передавального пристрою розрізняють редукторний електропривод, що містить один з видів механічного передавального пристрою, і безредукторний, в якому електродвигун безпосередньо з'єднаний з виконавчим органом.

За родом електричного перетворювального пристрою розрізняють:

- **Вентильний електропривод**, преосвітнім пристроєм в якому є тиристорний або транзисторний перетворювач електроенергії;
- **Система керований випрямляч-двигун (УВ-Д) вентильний електропривод** постійного струму, преосвітнім пристроєм якого є регульований випрямляч напруги;

- Система перетворювач частоти двигун (ПЧ-Д) вентильний електропривод змінного струму, преосвітнім пристроєм якого є регульований перетворювач частоти;
- Система генератор-двигун (Г-Д) і магнітний підсилювач-двигун (МУ-Д) регульований електропривод, преосвітнім пристроєм якого є відповідно електромашинний преосвітний агрегат або магнітний підсилювач.

За способом передачі механічної енергії виконавчому органу електроприводи поділяються на групові, індивідуальні та взаємопов'язані.

Груповий електропривод характеризується тим, що від одного двигуна приводиться в рух через трансмісію кілька виконавчих органів однієї або декількох робочих машин.

Кінематичний ланцюг в такому приводі складний і громіздкий, а сам електропривод є неекономічним, ускладнюється його експлуатація та автоматизація технологічних процесів.

Внаслідок цього трансмісійний електропривод в даний час майже не застосовується, він поступився місцем індивідуальному і взаємопов'язаному.

Індивідуальний електропривод характеризується тим, що кожен виконавчий орган робочої машини приводиться в рух своїм окремим двигуном.

Цей вид приводу в даний час є основним, так як при індивідуальному електроприводі спрощується кінематична передача (в деяких випадках вона повністю виключена) від двигуна до виконавчого органу, легко здійснюється автоматизація технологічного процесу, поліпшуються умови обслуговування робочої машини.

Індивідуальний електропривод широко застосовується в різних сучасних машинах, наприклад: у складних металорізальних верстатах, прокатних станах металургійного виробництва, підйомно-транспортних машинах, роботи-маніпулятори і т.п.

Взаємопов'язаний електропривод містить два або кілька електрично або механічно пов'язаних між собою індивідуальних електроприводів, при роботі яких підтримується задане співвідношення або рівність швидкостей, або навантажень, або положення виконавчих органів робочих машин.

Необхідність у такому приводі виникає за конструктивними або технологічних міркувань.

Прикладом багатодвигунного взаємопов'язаного електроприводу з механічним валом може служити привід довгого стрічкового або ланцюгового конвеєра, привід платформи механізму повороту потужного екскаватора, привід загальної шестерні потужного гвинтового преса.

У тому випадку, коли у взаємопов'язаному електроприводі виникає необхідність сталості співвідношення швидкостей робочих органів, які не мають механічних зв'язків, або коли здійснення механічних зв'язків утруднене, використовується спеціальна **схема електричного зв'язку двох або кількох електродвигунів, звана схемою електричного валу**.

Прикладом такого приводу може служити привід складного металообробного верстата, електропривод шлюзів і розвідних мостів і т.д.

Взаємопов'язаний електропривод широко застосовується в папероробних машинах, текстильних агрегатах, прокатних станах металургійного виробництва і т.д.

За рівнем автоматизації електроприводи можна розділити на неавтоматизовані, автоматизовані і автоматичні.

Два останніх типи електроприводів знаходять застосування в переважній більшості випадків.

2. Призначення та класифікація електричних апаратів керування та захисту

Електричні апарати керування та захисту служать для ручного чи автоматичного ввімкнення та вимкнення електричних ланцюгів та їх автоматичного захисту при різноманітних режимах.

За призначенням електричні апарати поділяються на комутаційні, що забезпечують ввімкнення та відключення електричних ланцюгів, захисні, захищаючи електричні ланцюги та електродвигуни від тривалої дії струмів, коротких замикань та перевантажень; керування, контролюючі та регульовальні, що застосовуються для автоматичної стабілізації чи регулювання заданих параметрів електричного ланцюга, і т.д.

В межах кожної з цих груп апарати відрізняються по напрузі, роду струму (постійний, змінний), роду захисту від оточуючого середовища, способу дії (електричні, індукційні, теплові, магнітоелектричні) та ряду інших факторів швидкодії, способу гасіння дуги і т.д.

По способу дії на електричний ланцюг розрізняють апарати контактні, котрі замикають або розмикають електричний ланцюг за допомогою контактів, та безконтактні, діючі на електричний ланцюг шляхом різкої зміни своєї провідності.

Апаратуру розрізняють по кліматичному виконанню, категорії розміщення і ступеню захисту такі ж, як і в електродвигунах.

Апаратуру виготовляють в п'яти кліматичних виконаннях та п'яти категоріях розміщення, що кодуються літерами У, УХЛ, Т, ОМ, М. Та цифрами 1, 2, 3, 4 та 5.

Електричні апарати мають оболонки, котрі забезпечують захист персоналу від дотику з частинами, що знаходяться під струмом, а апарат від попадання в нього пилу, твердих предметів, води.

Для позначення ступеню захисту електровиробів оболонками згідно ГОСТ 142554-80 застосовуються літери IP та наступні за ними дві цифри. Наприклад: IP12 означає, що оболонка захищає виріб від попадання твердих тіл розміром більш 2,5 мм. та інструментів товщиною більш 2,5 мм., а також падаючих вертикально капель води і т. д.

Контактні апарати бувають ручні та електромеханічного виконання, при якому рухомі контакти приводяться в дію за допомогою електромагніту. Всі ці апарати обов'язково містять контактний вузол, орган керування, а також можуть мати дугогасильні пристрої.

По конструктивному виконанню контактні вузли бувають (? Контакти) підрозділяють на важільні, місткові, врубні. Контактні поверхні, через які струм переходить з однієї струмоведучої деталі в іншу можуть мати слідує виконання: площа- площа, площа-сфера, площа-циліндр; циліндр-циліндр.

По призначенню контакти діляться на:

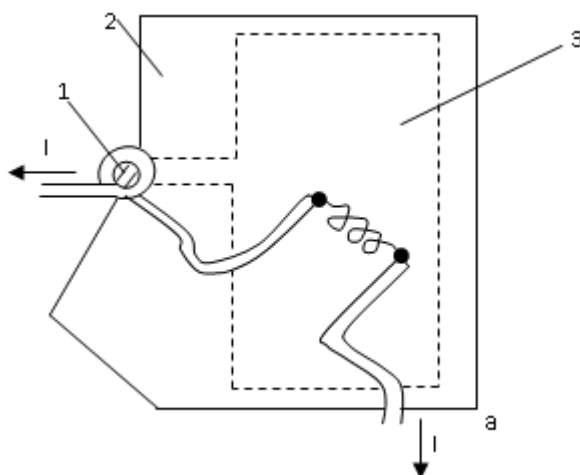
Головні, котрі вмикаються в ланцюг головного каналу, та блокуючі, (блок контакти), які використовуються в ланцюгах керування.

По дії контактів при початковій взаємодії з на орган керування їх називають замикаючими або розмикаючими.

Дугогасильні пристрої необхідні в апаратах, комутуючих великі струми, так як виникаюча при розриві струму електрична дуга, викликає підгоряння контактів. В

низьковольтних апаратах використовуються два види дугогасильних камер: з магнітним гасінням дуги та з деіонним.

При магнітному гасінні контакти поміщені всередині дугогасильної камери 2, виготовленого з теплостійкого ізоляційного матеріалу. З обох боків камера оточена сталеними щокми 3, прикріпленими до торців сталюого осердя 1 дугогасильного електромагніту, магнітне поле якого виштовхує дугу в вузьку дугу камери вгору.



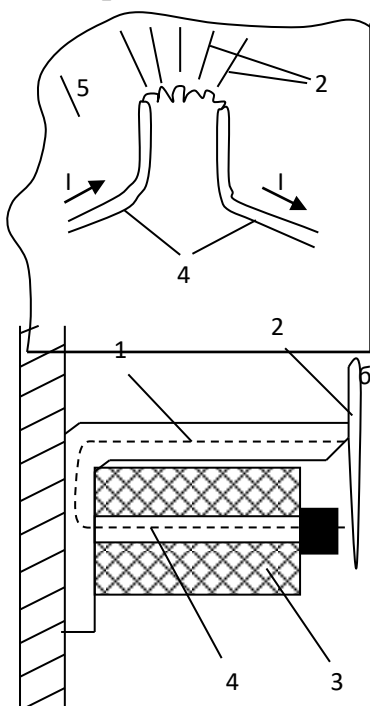
Будова дугогасильних камер:

а- з магнітним гасінням дуги;

б- з деіонним гасінням дуги.

При деіонному гасінні дуги над контактами 4, поміщений всередині дугогасильної камери 2, розташовується решітка із сталених пластин 5. При розмиканні контактів в утворившомуся між ними дуга потоком повітря видувається вгору, подається в зону металічної решітки та швидко гаситься.

Електромагніт - основний елемент електромеханічного органу керування. Електромагніт складається з нерухомого осердя 4, закріпленого на ярмі 1, рухомого якоря 2, та втягуючої котушки 3. Осердя якоря виготовляють з феромагнітного матеріалу, а котушки з мідного ізолюваного проводу.



Електромагніти постійного струму з поворотним якорем застосовуються в контакторах постійного струму, проміжних реле, електромагнітних реле часу.

В електромагнітах постійного струму значення та напрям магнітного потоку безперервно змінюються разом зі зміною напрямку струму в котушці 3. Тому осердя 4 та ярмі 2 виготовляють не суцільними, як у електромагнітних постійного струму, а шихтують з ізолюваних листів електротехнічної сталі. Це зменшує вихрові струми в магнітопроводі, втрати енергії та нагрівання.

Струм котушки електромагніту змінного струму залежить головним чином від індуктивності котушки, що визначається значенням повітряного зазору між осердям та якорем. При великому зазорі індуктивність та повний опір ланцюга котушки малі. Тому в момент включення котушки в мережу по ній протікає струм в 5 - 6 разів перевищуючий номінальний. З цієї причини котушка може швидко вийти з ладу при заклинюванні якоря в початку вмикання, коли магнітопровід розімкнений. Це обмежує також допустиму частоту вмикань електромагнітів змінного струму.

Тягове зусилля всіх електромагнітів залежить від сили струму котушки та повітряного зазору. Воно збільшується при зменшенні повітряного зазору.

Струм, при якому проходить втягування якоря електромагніту, вмикаючого послідовну котушку, током спрацювання, а струм, при якому якір відпадає, - струмом повернення. Він завжди менший струму спрацювання.

Аналогічно для електромагнітів з паралельною котушкою розрізняють напругу спрацювання та напругу повернення.

Відношення струму I_{Π} (напруга U_{Π}) повернення до струму $I_{\text{сп}}$ (напрузі $U_{\text{сп}}$) спрацювання називають коефіцієнтом повернення:

$$k = \frac{I_{\Pi}}{I_{\text{сп}}}, \text{ або } k_{\Pi} = \frac{U_{\Pi}}{U_{\text{сп}}}.$$

Для електромагнітів постійного струму цей коефіцієнт знаходиться в межах 0,05...0,4 ; для апаратів змінного струму - 0,4...0,95.

Електромагніти постійного струму звичайно мають час спрацювання, досягаючий кількох десятих долей секунди. Час спрацювання пускачів з електромагнітами змінного струму не перевищує 0,1 с.

3. Комутаційна апаратура ручного керування.

В залежності від призначення та використання розрізняють апарати силових ланцюгів та апарати ланцюгів керування.

Рубильник найбільш простий апарат ручного керування. Він призначений для нечастого вмикання електричних ланцюгів без навантаження та електричних приймачів невеликої потужності. В залежності від електричних параметрів розрізняють рубильники трьохполюсні, двохполюсні, однополюсні, з дугогасильними камерами та без них, на номінальний струм 100, 250, 400, 600 А.

По конструктивному виконанню рубильники бувають в кожуху, з переднім чи заднім приєднанням з центральною чи боковою рукояткою, комбіновані з запобіжниками. Різновид рубильників представляють перемикачі на два робочих та одне нейтральне положення.

Рубильники мають шифр позначень, що складається з букв та цифр:

Р - рубильник з центральною рукояткою;

РБ - з боковою рукояткою;

РПЦ - з центральним важільним приводом.

Перша цифра після букв вказує число полюсів, друга - умовно визначає номінальний струм рубильника. Наприклад РБ-32 — рубильник з боковою рукояткою, трьохполюсний, з номінальним струмом 250 А.

Силові ящики мають буквенний шифр ЯВЗ (ящик, вимикач, закритий).

Пакетні вимикачі та перемикачі як і рубильники призначені для нечастих вмикань в мережах змінного струму до 380 В. Існує багато різних виконань пакетних вимикачів.

По конструктивному виконанню пакетні вимикачі та перемикачі діляться на захищені, закриті та герметичні. Пакетні вимикачі компактні, надійнопрацюють при трясці, тому вони зручні для застосування на пересувних установках.

Для складних схем перемикання силових ланцюгів, наприклад обмоток багатошвидкісних асинхронних двигунів, керування тяговими та крановими електродвигунами, застосовують барабанні, типу БП та пакетно-кулачкові типу ПКК перемикачі, їх застосовують при частоті перемикання до 120 за годину. Допустимий струм відключення, так само як і для рубильників без дугогасильних камер налічує 30% від номінального.

Апарати для комутації ланцюгів керування розраховують на меншу силу струму та більш допустиме число перемикань.

Ці апарати виготовляють одно- та багатоланцюговими, з двома та більше положеннями. Вони, по суті, такі ж, як для силових ланцюгів, але менших розмірів.

Найбільш розповсюдженими перемикачами ланцюгів керування являються апарати серії ПКУ2; ПКУ3 розраховані для напруг до 380 змінного та 220 постійного струму та маючі номінальний струм 6А (ПКУ2) та 10А (ПКУ3).

Ручна комутація ланцюгів котушок електромагнітних пускачів для вмикання та вимикання електродвигунів та інших струмоприймачів. При дистанційному керуванні здійснюється кнопками керування.

По способу захисту від дії оточуючого середовища розрізняють відкриті, закриті та вибухонебезпечні кнопки.

4. Апаратура та пристрої автоматичного керування.

Контактори. Дистанційне та автоматичне керування електродвигунів постійного струму виконується за допомогою контакторів постійного струму, їх виготовляють одно- та багатополюсними, з замикаючими та розмикаючими контактами.

Контактори змінного струму застосовують для керування електродвигунами змінного струму великої потужності, а також при великій частоті їх вмикань. Для гашення дуги в них застосовують дугогасильні камери з деіоновими решітками. Контактори зміненого струму серії КТ мають електромагніт з поворотним якорем та контакти важільного типу. Виготовляють їх на струми від 20 до 600 А.

Значними досягненнями техніки в виробництві контактної апаратури являються контактори з використанням геометричних силових контактів (герсиконів). Наприклад контактори на герсиконах КМГ17, КМГ18 призначені для керування двигунами до 3 кВт при напрузі 380 В.В герсиконах контакти розміщені в геометричній оболонці в середовищі інертного газу, вони спрацьовують під дією зовнішнього магнітного поля, створюємого котушкою. Контактори з використанням герсиконів велику довговічність, надійно працюють в підвищеної запиленості, вологості та інших несприятливих факторів оточуючого середовища.

Електромагнітні пускачі: призначені для дистанційного та автоматичного керування трифазними асинхронними двигунами з номінальним струмом до 200 А. (100 кВт). їх застосовують також дистанційного керування трифазними електронагрівальними, освітлювальними та опромінюючими установкам.

Основні частини електромагнітного пускача — електромагніт змінного струму з прямоходовим якорем, контакти місткового типу, замикаючі та розмикаючі блок-контакти.

Будова електромагнітних пускатів:

Електромагнітні пускаті являють собою комплексні пристрої, в склад яких, крім прямоходового контактора, входять електротеплове реле та захисний кожух.

Для пуску електродвигунів на два напрями обертання виготовляють реверсивні пускаті, котрі складаються з двох нереверсивних, змонтованих в одному кожуху та забезпечені механічним блокуванням, яка виключає одночасні вмикання.

Пускаті ПМЛ передбачена можливість приєднання приставки ПКЛ з двох або чотирьох додаткових контактів.

Пускаті ПМЛ виготовляють на номінальні струми від 10 до 200 А семи розмірів, різноманітними по виконанню в залежності від ступеня захисту, категорії розміщення і т.д.

Всі пускаті можна встановлювати в мережі напругою 380 В.

Номінальний струм електродвигунів беруть з довідника або обчислюють за формулою:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H}$$

Котушки виготовляють на напругу 380-220 В, інколи на 24, 48, 60, 110, та 220В постійного струму.

Пускаті надійно працюють при змінному струмі в межах (0,85...1,05) U_H . Допустимі межі напруги на котушках постійного струму (0,5... 1,05) U_H .

Електромагнітні реле знаходять широке застосування в ланцюгах керування автоматизованими електроприводами. По принципу дії та наявності основних елементів вони нічим не відрізняються від контакторів. Реле комутують невеликі струми, це дозволяє спростити контактну систему, відмовитися від пристроїв дугогасіння, збільшити число контактів.

По допустимій розривній потужності реле можна розділити на 3 групи: сильнотрумові розривна потужність - до 500 Вт, проміжні - до 150 Вт, слабострумні - до 20 Вт.

Найбільш розповсюджені реле великої потужності РПЛ, середньої - РПУ, малої - РЭН, РСМ, РС.

В пристроях автоматики знайшли широке застосування реле з герметизованими магнітокерованими контактами (геркони).

На базі герконів випускаються різноманітне реле РПГ проміжні, РНГ - напруги, РТГ - струмове, слабкострумове РЭС-42...РЭС-86. Всі ці реле допускають велике число спрацювань ($1 \cdot 10^8 \dots 2 \cdot 10^8$), велику частоту вмикань за годину.

Реле часу забезпечують необхідну видержку часу при автоматизованому пуску, роботу електрообладнання по заданій програмі. Вони бувають з годинниковим механізмом, електродвигунні, пневматичні, електромагнітні, конденсаторні, електронні.

Двохкамерне реле часу 2 РВМ застосовується в тих випадках, коли необхідно виконати добовий цикл програм. Таке реле складається з анкерного годинникового механізму з автоматичним під заводом пружини від мікродвигуна та програмного пристрою. Основною частиною програмного пристрою являється диск з двома рядами отворів, в які, згідно програмам, вгвинчуються штифти. Під час руху диску штифти взаємодіють через важільні пристрої на замикаючі контакти.

Електродвигунні (моторні) реле часу призначені для роботи в схемах автоматичного керування електроприводами, коли потрібні витримки порядку десятків, сотень секунд, та для послідовного комутування декількох ланцюгів. Реле представляють собою електромеханічний пристрій з приводом від синхронного мікродвигуна.

Пневматичне реле часу РВП2 забезпечує уповільнення сигналу в межах 0,5...180 сек. і складається з електромагнітного пристрою, повітряного уповільнювача, мікровимикача. Затримка регулюється за допомогою регулювальної голки з гвинтовим приводом.

В конденсаторних реле використовується явище перехідного процесу при зарядці чи розрядці конденсатора через опір в ланцюзі постійного струму.

Нові електронні реле часу серії ВЛ побудовані на напівпровідникових елементах з застосуванням мікросхем, відрізняються високою надійністю роботи та широкою номенклатурою виконання. В реле цієї серії застосовується явище заряду конденсатора (ВЛ-43, ВЛ-44, ВЛ-48) або принцип перерахунку імпульсів (ВЛ-45).

Реле часу вибирають згідно з вимогою діапазону витримок часу, напругою живлення, ступенем захисту та іншими показниками.

Кінцеві (шляхові) перемикачі або вимикачі призначені для комутації ланцюгів керування в залеженості відположення механізму (навозоприбиральний транспортер ТС-1). Контактні вимикачі бувають прямого (сповільненого) та непрямої (миттєвої) дії. Ці перемикачі комутують струм до 6А при напрузі змінного струму до 500В.

Мікровимикачі з малим робочим ходом штовхача при натисненні з невеликим зусиллям і миттєво перемикаючимися контактами (струм до 2,5А при напрузі 380В).

Більш широке розповсюдження отримали безконтактні шляхові перемикачі генераторного типу (БЗК-24, БВК-321-24, БТП).

- з використанням фото діодів ВПБ-15-32

- з використанням оптико-електронної схеми (працюють на диференціальному принципі), (3 фото діода + інфрачервоний випромінювач).

Кінцеві та шляхові вимикачі вибирають по ступеню захисту від дії оточуючого середовища, напрузі, комутуючому струму, зносостійкості, допустимій швидкості переміщення, вартості та ін. показники.

Список використаної літератури

1. Паначевний Б. І., Свергун Ю. Ф. Загальна електротехніка, теорія і практикум. — К.: Каравела, 2004.
2. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Електроніка і мікросхемотехніка. — К.: Каравела 2006.
3. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка. — К.: Каравела, 2004.
6. Борисов О. В., Гусев В. О., Якименко Ю. І. Твердотільна електроніка. — К.: Політехніка, 2004.
7. Іванов І.І. Равдоник В.С. Електротехніка. Навчальний посібник для неелектричних спеціальностей вузів. - М.: Вища школа. 2007. - 375 с.
8. Коруд В.І., Гамола О.Є.Електртехніка: Підручник. Львів: «Манголія 2006», 2008. — 447 с
9. Мілих В.І., Шавльолкін О.О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. К.: Каравела, 2007.— 688 с.
10. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие. - М.: Высш. школа, 2000. - 751 с.
11. Жаворонков М.А., Кузин А.В. Электротехника и электроника: Учеб. пособие. - М.: Изд. центр "Академия", 2005. - 400 с.
12. Иванов И.И., Лукин А.Ф., Соловьев Г.И. - Электротехника. Основные положения, примеры и задачи. — СПб.: Изд-во «Лань», 2002. — 192 с.
13. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учебник. - М.: Изд. центр "Академия", 2008. - 544 с.
14. Рекус Г.Г., Белоусов А.И.. Сборник задач по электротехнике и основами электроники: Учеб. пособие.- М: Высш. школа, 2001. - 416 с.

Сіренко Віктор Федорович
Савойський Олександр Юрійович
Вольвач Тетяна Сергіївна

Електротехніка та автоматика
Конспект лекцій для студентів 2 та 1с.т. курсів спеціальності
208 "Агроінженерія"
ОС «Бакалавр»
денної та заочної форм навчання

Частина 1. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Сумський НАУ, вул.. Г. Кондратьєва 160

Підписано до друку р. Тираж 20 прим. Гарнитура. Times New Roman.
Умовн. Друк. арк. 2,0 замовл.
