

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА АВТОМАТИКА

методичні вказівки
до виконання самостійної роботи
Частина 1

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра «Енергетики та електротехнічних систем»

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА АВТОМАТИКА

методичні вказівки
до виконання самостійної роботи
Частина 1

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

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. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи для студентів 2 та 1 с.т. курсів спеціальності 208 "Агроінженерія" ОС «Бакалавр» денної та заочної форм навчання. Частина 1 – Суми: Сумський національний аграрний університет, 2022. - 59 с.

Методичні вказівки спрямовані на надання методичної допомоги студентам під час виконання самостійної роботи. Містять загальні методичні рекомендації, практичні завдання та питання для самоконтролю знань.

Рецензенти:

Кравченко В.О. - кандидат фізико-математичних наук, ст. викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ.

Ярошенко П. М. - кандидат технічних наук, доцент 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.....	11
Тема 3. Електричне коло змінного струму.....	20
Тема 4. Трифазні електричні системи.....	22
Тема 5. Трансформатори.....	28
Тема 6. Асинхронні електродвигуни.....	33
Тема 7. Електронні прилади та пристрої.....	45
Тема 8. Електропривід апаратура керування та захисту.....	48
Тема 9. Виробництво, розподіл електричної енергії.....	53
Список використаної літератури.....	58

Тема 1. Електричне коло постійного струму

Методи розрахунку електричних кіл за допомогою безпосереднього застосування законів Кірхгофа.

1. Метод еквівалентних перетворень.
2. Метод безпосереднього застосування законів Кірхгофа.
3. Метод контурних струмів.
4. Метод еквівалентного генератора.

1. Метод еквівалентних перетворень

Розгалужені кола з одним джерелом ЕРС доцільно розраховувати методом еквівалентних перетворень (інша назва - метод згортання), який полягає в заміні ділянок кола еквівалентними опорами. У табл. 1 подано схеми ділянок кола, еквівалентні їм схеми і формули для визначення еквівалентних опорів. Перетворення електричного кола називається еквівалентним, якщо в його частинах, які не змінилися, напруги і струми зберігаються.

За допомогою еквівалентної заміни можуть спрощуватися до одного елемента ділянки з послідовним або паралельним з'єднанням резистивних елементів. Можлива також заміна групи елементів, з'єднаних у «трикутник», групою елементів, з'єднаних у «зірку», і навпаки.

Тип з'єднання	Схема ділянки	Еквівалентна схема ділянки	Формули еквівалентних опорів
Послідовне			$R_e = \sum_{k=1}^n R_k$
Паралельне			$R_e = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}$
Паралельне (два резистивних елемента)			$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
Трикутник			$R_a = \frac{R_{ca} R_{ab}}{R_{ca} + R_{ab} + R_{bc}}$ $R_b = \frac{R_{ab} R_{bc}}{R_{ca} + R_{ab} + R_{bc}}$ $R_c = \frac{R_{bc} R_{ca}}{R_{ca} + R_{ab} + R_{bc}}$
Зірка			$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}$ $R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}$ $R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}$

Таким чином, крок за кроком спрощують схему кола і зрештою приводять її до одного еквівалентного опору R_e по відношенню до затисків джерела живлення U або E .

У такій ситуації струм джерела, який проходить і через еквівалентний елемент з опором R_e , знаходиться за законом Ома:

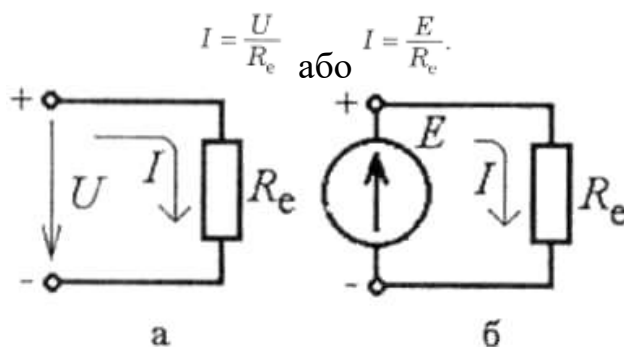


Рис. 2.5

Потім проводять зворотний рух по кроках перетворення схеми кола до вихідної. При цьому по черзі розраховують напруги на ділянках кола за відомими струмами і розподіл струмів у паралельних вітках за визначеними напругами на ділянках кола.

2. Метод безпосереднього застосування законів Кірхгофа

Цей метод застосовується в тому випадку, якщо в електричному колі є два і більше джерел електроенергії, які розташовані в різних його вітках. Метод безпосереднього застосування законів Кірхгофа не можна віднести до найбільш ефективних методів, тому що він потребує, у порівнянні з іншими методами, більшого обсягу розрахункової роботи. Проте цей метод не потребує спеціальної підготовки: достатньо знання законів Кірхгофа, хоча ще потрібно вміти розв'язувати системи алгебраїчних рівнянь.

Процес розв'язання задачі розрахунку електричного кола цим методом полягає в наступному.

Для даного кола визначають (рис. 1) кількості вузлів n і віток m . Напрямами струмів у вітках задаються довільними. Для відповідної кількості вузлів кола складають $(n-1)$ рівняння за першим законом Кірхгофа. Останні $[m-(n-1)]$ рівнянь складають за другим законом Кірхгофа для будь-яких контурів, але кожний наступний контур повинен захоплювати хоча б одну нову вітку, яка ще не входить до попередніх контурів (у результаті повинні бути задіяні всі вітки кола). Напрямок обходу кожного контура обирають довільно.

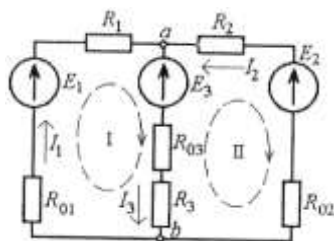


Рис. 1

Так, наприклад, для кола за рис. 1 повинні бути задані вихідні дані: $E_1, E_2, E_3, R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_1, R_2, R_3$. У цьому колі кількість вузлів $n=2$, кількість віток i , відповідно, кількість невідомих струмів $m=3$.

За першим законом Кірхгофа для вузла а маємо $I_1 + I_2 - I_3 = 0$.

За другим законом Кірхгофа для I і II контурів:

$$\begin{aligned} (R_1 + R_{01})I_1 + (R_3 + R_{03})I_3 &= E_1 - E_3; \\ -(R_2 + R_{02})I_2 - (R_3 + R_{03})I_3 &= E_3 - E_2. \end{aligned}$$

Необхідно підставити в систему числові значення ЕРС і опорів та розв'язати цю алгебраїчну систему рівнянь яким-небудь відомим математичним методом. У результаті будуть знайдені струми у вітках електричного кола, що розглядається.

3. Метод контурних струмів

Цей метод є похідним від методу, який побудовано на безпосередньому застосуванні законів Кірхгофа.

Кількість контурних струмів визначається структурою конкретного електричного кола. При цьому контури обираються довільно, але вони повинні бути незалежними, тобто кожний черговий контур повинен містити хоча б одну вітку, яка не входить до інших контурів, а в підсумку не повинно залишитися віток, по яких не пройшов хоча б один контурний струм. Напрямок струму кожного контура вибирається довільно, а напрямок обходу контура - за напрямком його струму.

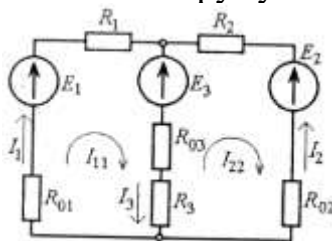


Рис. 2

Для кожного контура складається рівняння за другим законом Кірхгофа. При цьому для суміжних віток, що входять до складу двох або більше контурів, спади напруг записуються від усіх контурних струмів зі своїми знаками. Так для кола, зображеного на рис. 2, із заданими ЕРС E_1, E_2, E_3 , внутрішніми опорами R_{01}, R_{02}, R_{03} і параметрами споживачів R_1, R_2, R_3 запишемо таку систему рівнянь для контурних струмів I_{11} і I_{22} :

$$\begin{aligned}(R_1 + R_{01} + R_3 + R_{03})I_{11} - (R_3 + R_{03})I_{22} &= E_1 - E_3; \\(R_2 + R_{02} + R_3 + R_{03})I_{22} - (R_3 + R_{03})I_{11} &= E_2 - E_3.\end{aligned}$$

Результатом розв'язання цієї системи є контурні струми I_{11} і I_{22} .

Дійсні струми у вітках визначаються як алгебраїчна сума контурних струмів, що проходять по вітці, яка розглядається (позитивні напрямки задають дійсні струми, а контурні струми одного напрямку з дійсними струмами беруться зі знаком «+», струми протилежного напрямку - зі знаком «-»). У даному разі на рис. 2 маємо дійсні струми $I_1 = I_{11}$; $I_2 = -I_{22}$; $I_3 = I_{11} - I_{22}$.

У загальному випадку, для будь-якого складного кола, що має n контурних струмів, можна скласти формалізовану систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} + I_{33}R_{13} + \dots I_{kk}R_{1k} \dots\dots + I_{nn}R_{1n} = E_{11}; \\ I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} + I_{33}R_{23} + \dots I_{kk}R_{2k} \dots\dots + I_{nn}R_{2n} = E_{22}; \\ I_{11}R_{31} + I_{22}R_{32} + I_{33}R_{33} + \dots I_{kk}R_{3k} \dots\dots + I_{nn}R_{3n} = E_{33}; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ I_{11}R_{k1} + I_{22}R_{k2} + I_{33}R_{k3} + \dots I_{kk}R_{kk} \dots\dots + I_{nn}R_{kn} = E_{kk}; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ I_{11}R_{n1} + I_{22}R_{n2} + I_{33}R_{n3} + \dots I_{kk}R_{nk} \dots\dots + I_{nn}R_{nn} = E_{nn} \end{array} \right.$$

Тут k - змінний номер контурів; $R_{11}, R_{22}, R_{33}, \dots, R_{kk}, \dots, R_{nn}$ - власні опори контурів, які дорівнюють сумі опорів усіх елементів що входять у даний контур; $R_{ik} = R_{ki}$ - взаємні опори.

Взаємні опори записуються зі знаком «+», коли контурні струми в них збігаються за напрямком, у протилежному випадку - зі знаком «-».

$E_{11}, E_{22}, E_{33}, \dots, E_{kk}, \dots, E_{nn}$ - контурні ЕРС, кожна з яких дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС відповідного контура. При цьому знак кожної ЕРС, яка входить до контура, визначається напрямком його обходу: ЕРС позитивна, якщо напрямок її збігається з обходом контура, негативна - якщо не збігається.

Як вже було зазначено, розв'язання системи алгебраїчних рівнянь яким-небудь математичним методом дає шукані контурні струми $I_{11}, I_{22}, I_{33}, I_{kk}, I_{nn}$. І вже через контурні струми знаходяться дійсні струми в будь-якій із віток кола.

4. Метод еквівалентного генератора

Методом еквівалентного генератора звичайно користуються при розрахунку струму в будь-якій одній вітці електричного кола. Крім того, цей метод показовий у тому плані, що дає можливість еквівалентної заміни практично будь-якого електричного кола (або його частини), яке містить як пасивні, так і активні елементи.

Розглянемо суть методу на прикладі електричного кола на рис. 3.

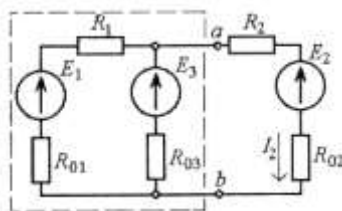


Рис. 3

Нехай параметри елементів цього кола задані і необхідно визначити струм I_2 у вітці з опором R_2, R_{02} і джерелом ЕРС E_2 .

Усе електричне коло, за винятком тієї вітки, де шукається струм, замінюють еквівалентним генератором.

Еквівалентний генератор, схема заміщення якого подана на рис. 4, характеризується ЕРС E_{er} (ЕРС еквівалентного генератора) і внутрішнім опором R_{er} .

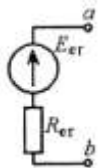


Рис. 4

У такому разі еквівалентним генератором замінюється частина кола, яка на рис. 3 обведена пунктирною лінією і зображена окремо на рис. 5. У частині кола, що замінюється, і еквівалентного генератора вихідні зажимки a і b однакові.

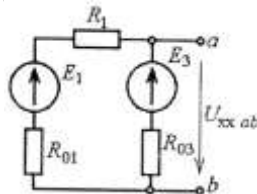


Рис. 5

Загальний принцип визначення параметрів еквівалентного генератора полягає в наступному. ЕРС E_{er} дорівнює напрузі холостого ходу U_{xxab} на розімкнених зажимах ab частини кола, яка замінюється, тобто $E_{er} = U_{xxab}$. Таким чином, щоб знайти E_{er} , належить у частині кола за рис. 5 будь-яким відомим способом (розв'язуючи локальну задачу для цієї частини кола) знайти напругу U_{xxab} на зажимах ab .

Внутрішній опір еквівалентного генератора $R_{ег}$ дорівнює вхідному опору $R_{вх\alpha b}$ всього останнього кола (рис. 5) між затискачами a і b , але за умови, що це коло стає пасивним. Тобто при визначенні величини $R_{ег}$ ЕРС джерел не враховуються, а в вітках зберігаються тільки їхні внутрішні опори (в даному разі - R_{01} і R_{03}). Таке пасивне коло подано на рис. 6. Тоді $R_{вх\alpha b}$ і, отже, $R_{ег}$ визначаються як еквівалентний опір цього кола відносно затискачів a і b .

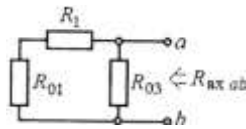


Рис. 6

Після того, як параметри еквівалентного генератора знайдено, приєднаємо до його схеми заміщення вітку, що залишилася на рис. 4 за межами тієї частини, яка тепер замінена цим генератором. Отримуємо схему, подану на рис. 7.

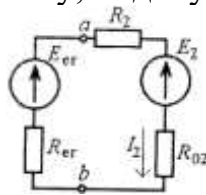


Рис. 7

У цій одноконтурній схемі шуканий струм визначається уже досить просто:

$$I_2 = \frac{E_{ef} - E_2}{R_{ef} + R_2 + R_{02}}.$$

Тема 2. Електромагнетизм і магнітні кола

1. Базові знання для засвоєння курсу теоретичних основ електротехніки.
2. Закони електромагнетизму.
3. Визначення параметрів схем заміщення приймача і джерела електричної енергії в колі постійного струму.
4. Структурні поняття електричних кіл.

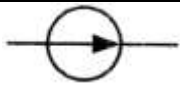
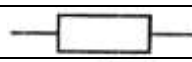
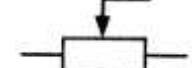
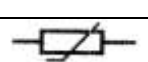
1. Базові знання для засвоєння курсу теоретичних основ електротехніки

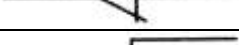
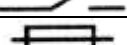
ЛІТЕРНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

№ з/п	Назва величини	Позначення	Одиниця вимірювання	Примітка
1	Заряд електричний	Q	К (кулон)	
2	Індуктивність власна	L	Гн (генрі)	$1\text{мГн} = 10^{-3}\text{ Гн}$ $1\text{мкГн} = 10^{-6}\text{ Гн}$
3	Індуктивність взаємна	M	Гн	
4	Коефіцієнт потужності	χ		
5	Коефіцієнт потужності при синусоїдних струмові та напрузі	$\cos\varphi$		
6	Коефіцієнт трансформації	n		
7	Потужність активна	P	Вт (ват)	$1\text{кВт} = 10^3\text{ Вт}$ $1\text{МВт} = 10^6\text{ Вт}$
8	Потужність повна	S	В А	$1\text{кВА} = 10^3\text{ ВА}$
9	Потужність реактивна	Q	Вар	$1\text{кВар} = 10^3\text{ Вар}$
10	Потужність миттєва	P	В А	
11	Напруга електрична	U	В (вольт)	$1\text{мВ} = 10^{-3}\text{ В}$ $1\text{мкВ} = 10^{-6}\text{ В}$
12	Напруга магнітна	U_M	А (ампер)	
13	Густина струму	J	А/м ²	
14	Потенціал електричний	V	В	
15	Потокозчеплення	ψ	Вб (вебер)	$1\text{мкВб} = 10^{-6}\text{ Вб}$
16	Опір електричний (постійного струму)	R	Ом	$1\text{кОм} = 10^3\text{ Ом}$ $1\text{МОм} = 10^6\text{ Ом}$
17	Опір електричний активний	R	Ом	
18	Опір електричний повний	Z	Ом	
19	Опір електричний реактивний	X	Ом	
20	Провідність електрична повна	Y	См (сіменс)	
21	Провідність електрична активна	G	См	
22	Провідність електрична реактивна	B	См	
23	Сила магніто-рушійна	F_M	А	

	вздовж замкненого шляху			
24	Опір магнітний	R_M	$1/\Gamma_H$	
25	Струм	I	А (ампер)	$1\text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$ $1\text{ мкА} = 10^{-3} \text{ А}$
26	Кількість витків	w		
27	Стала часу електрична	τ	с	
28	Електрорушійна сила	E	В	
29	Частота коливань	f	Гц (герц)	
30	Частота коливань кутова	ω	рад/с	
31	Частота обертань	n	об/хв.	
32	Коефіцієнт корисної дії	η		
33	Ємність	C	Ф (фарад)	$1\text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ $1\text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$ $1\text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$
34	Енергія	W	Дж (джоуль)	
35	Магнітна індукція	B	Тл (тесла)	$1\text{ мТл} = 10^{-3} \text{ Тл}$
36	Магнітна проникність	μ	Гн/м	
37	Діелектрична проникність	ϵ	Ф/м	
38	Магнітний потік	Φ	Вб	$1\text{ мкВб} = 10^{-6} \text{ Вб}$
39	Напруженість магнітного поля	H	А/м	$1\text{ кА/м} = 10^3 \text{ А/м}$

ОСНОВНІ ГРАФІЧНІ ПОЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМАХ

№ з/п	Вид елемента	Літерне позначення	Графічне позначення
1	Джерело напруги	E	
2	Джерело струму	J	
3	Елемент гальванічний чи акумулятор	G	
4	Резистор	R	
5	Резистор із змінним опором	R	
6	Конденсатор	C	
7	Конденсатор зі змінною ємністю	C	
8	Котушка індуктивності	L	
9	Котушка індуктивності з осердям	L	
10	Нелінійний елемент	HE	

11	Трансформатор	T	
12	Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором	АД	
13	Асинхронний двигун із фазним ротором	АД	
14	Машина постійного струму	G(M)	
15	Обвитка реле	K	
16	Контакт на замикання	K	
17	Контакт на розмикання	K	
18	Перемикач	K	
19	Автоматичний вимикач	AB	
20	Запобіжник	F	
21	Амперметр		
22	Вольтметр		
23	Ватметр		
24	Напівпровідниковий діод	VD	
25	Стабілізатор		
26	Транзистор		
27	Заземлення		

ГРАФІЧНЕ ПОЗНАЧЕННЯ РЕЗИСТОРІВ ІЗ ПОЗНАЧЕННЯМ НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ РОЗСІЯННЯ

Графічне позначення резисторів	Номінальна потужність, Вт
	0,05
	0,125
	0,25
	0,5
	1
	2
	5

2. Закони електромагнетизму

Закон Джоуля-Ленца: теплова енергія, що виділяється в провіднику (наприклад, у резисторі, як на рис. 4), дорівнює добутку квадрата сили струму I , опору провідника R і часу t , а саме:

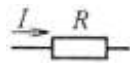


Рис. 4

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

Закон Біо-Савара-Лапласа: індукція $d\vec{B}$ магнітного поля, що створюється елементом струму $I d\vec{l}$ на відстані r від нього в однорідному середовищі з відносною магнітною проникністю μ_r (рис. 5), обернено пропорційна квадрату відстані і прямо пропорційна елементу струму і синусу кута β поміж векторами $d\vec{l}$ і $\vec{r}$, тобто у векторній, а потім і в скалярній формах:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi r^3} [I d\vec{l} \times \vec{r}], \quad dB = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi r^2} Idl \sin\beta,$$

де $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна стала.

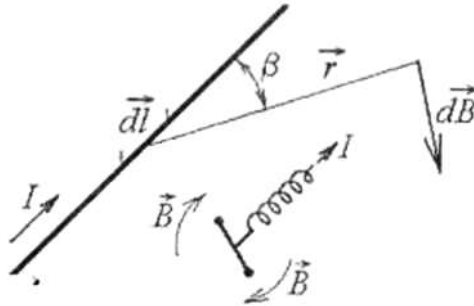


Рис. 5

Напрямок вектора магнітної індукції визначається відомим правилом буравчика, як показано на рис. 5.

Закон повного струму: циркуляція вектора напруженості $\vec{H}$ магнітного поля по контуру Γ (рис. 6) дорівнює алгебраїчній сумі струмів, що охоплюються цим контуром:

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = \sum I,$$

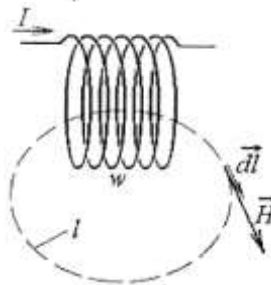


Рис. 6

де повний струм $\sum I = wI$,

w - кількість витків котушки, по котрій проходить струм I .

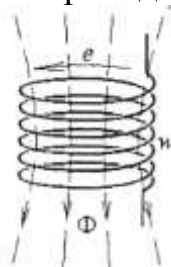


Рис. 7

Закон електромагнітної індукції: ЕРС e , яка індукується в провідниковому контурі або котушці (рис.7), дорівнює швидкості зміни його магнітного потокозчеплення 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 к-ий. виток.

У частковому випадку, коли всі витки пронизуються однаковим магнітним потоком, $\Psi = \omega\Phi$, і тоді ЕРС:

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

У загальному випадку для елемента $d\vec{l}$ провідника, який переміщується зі швидкістю $\vec{V}$ в магнітному полі з індукцією $\vec{B}$ (рис. 8) ЕРС має вираз:

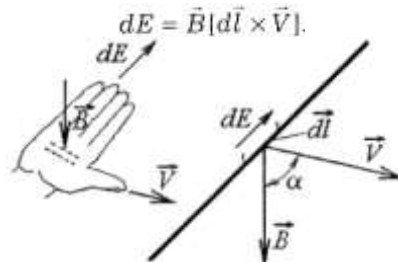


Рис. 8

Якщо при цьому магнітне поле однорідне, тобто індукція $\vec{B}$ скрізь однакова за величиною і напрямком, ЕРС на всю довжину l провідника:

$$E = VB l \sin \alpha.$$

Напрямок ЕРС визначається правилом правої руки (рис. 8).

Закон Ампера (рис. 9) виражає силу Ампера:

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l} \times \vec{B}],$$

котра діє на елемент довжини $d\vec{l}$ провідника зі струмом I , який розташовується в магнітному полі з індукцією $\vec{B}$.

У простішому випадку, при однорідному магнітному полі на всю довжину l провідника діє сила Ампера:

$$F_A = I B l \sin \alpha.$$

Напрямок сили Ампера визначається правилом лівої руки (рис. 9).

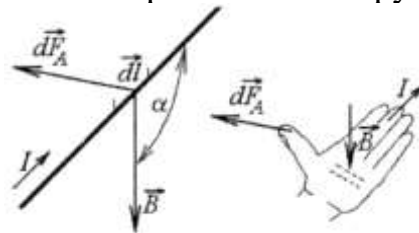


Рис. 9.

Правило Ленца: індукційний струм i , який виникає у замкненому контурі, має такий напрямок, що створений ним магнітний потік крізь площу, обмежену контуром, прагне компенсувати ту зміну потоку, яким викликається даний струм.

На рис. 10 як окрема ілюстрація правила Ленца вказано напрямок потоку Φ_i магнітного поля, що збуджується струмом i , який, у свою чергу, індукований магнітним потоком Φ постійного магніту, який вноситься в контур.

Відомо, що правило Ленца безпосередньо торкається закону електромагнітної індукції, визначаючи напрямок індукованої ЕРС, як і напрямок струму, що нею викликається.

Закон Кулона визначає силову взаємодію вільних електричних зарядів: двоє точкових зарядів, що знаходяться в однорідному діелектрику з відносною діелектричною проникністю ϵ_r , взаємодіють один з одним із силою F_k , яка пропорційна добутку зарядів q_1 та обернено пропорційна квадрату відстані r між ними (рис. 11):

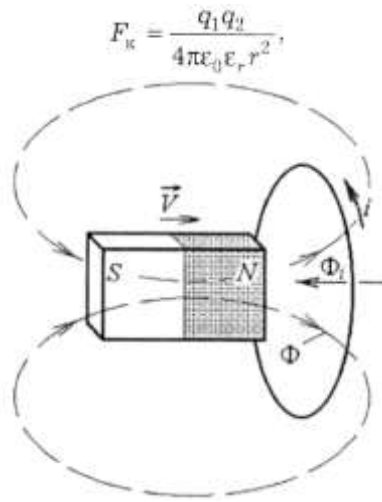


Рис. 10

де $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - електрична стала.

Сила спрямована по лінії, яка з'єднує заряди, і відповідає притягненню для різнойменних зарядів (рис. 11, а) і відштовхуванню для однойменних (рис. 11, б).

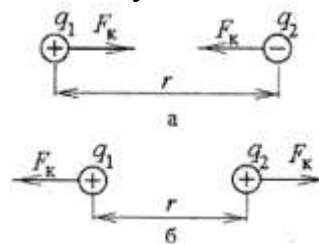


Рис. 11

На завершення запропонуємо емблему-символ електротехніки (рис. 12). У цій алегорії виявляються основи електротехніки. У центрі знаходиться птах Electrical Engineering - Електротехніка, що летить зі швидкістю V в магнітному полі, яке характеризується індукцією B . У відповідності з законом електромагнітної індукції в крилах птаха виникає ЕРС E . Коли крила торкнулись провідникового кільця Electrical Engineering, то під дією ЕРС в контурі, що утворився, з'явиться струм I . I у відповідності із законом Ампера взаємодія струму з магнітним полем приводить до виникнення сили F . Напрямки всіх величин на емблемі відповідають загальновідомим встановленим правилам.

На явищах, згаданих вище, побудовано принцип дії більшості електротехнічних пристроїв, тільки в різних випадках змінюється послідовність логічного ланцюжка їхніх взаємозв'язків: одні величини стають первинними, а інші - вторинними.

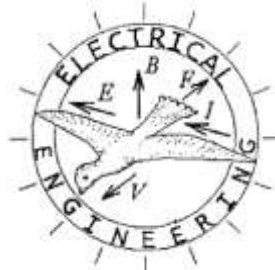


Рис. 12

Із відкриттям законів електромагнетизму в XIX столітті почалася ера Електротехніки - практичного використання відповідних явищ. І з того часу птах - Electrical Engineering став приносити і буде завжди приносити людям щастя, що символізують проміння, які виходять із Electrical Engineering, адже Електротехніка, окрім всього іншого, дає і світло, і тепло. І щоб повністю це усвідомити, належить пізнати науку під загальною назвою ЕЛЕКТРОТЕХНІКА.

3. Визначення параметрів схем заміщення приймача і джерела електричної енергії в колі постійного струму

На рис. 1.14, рис. 1.16 і рис. 1.18 апріорі подані електричні схеми заміщення реальних електротехнічних об'єктів. Розглянемо походження деяких із цих схем на прикладі приймача R_H і джерела електричної енергії постійного струму G , що зібрані в спільне електричне коло, принципова електрична схема якого показана на рис. 1.19.

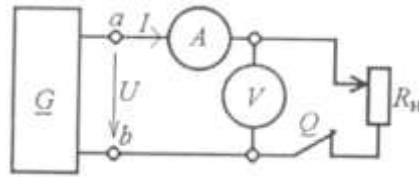


Рис. 1.19

При постійному струмі в приймачах достатньо врахувати один процес - необоротне перетворення електричної енергії, наприклад, у теплову енергію, що заміщується одним ідеальним резистивним елементом (див. рис. 1.14, а). Вимірявши на приймачі напругу U вольтметром V і силу струму I амперметром A , можна на основі закону Ома (1.5) визначити опір резистивного елемента:

$$R_H = \frac{U}{I}$$

Для джерела електроенергії постійного струму необхідно враховувати два процеси:

- 1) здатність створювати різницю потенціалів на своїх вихідних затискачах і породжувати струм у замкненому електричному колі;
- 2) внутрішнє тепловиділення при проходженні струму через джерело.

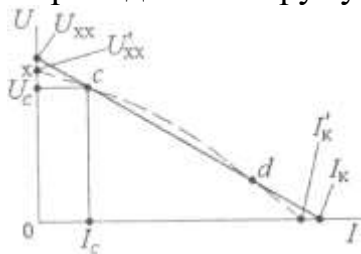


Рис. 1.20

Відповідно, у схемах заміщення реального джерела присутні два ідеальні елементи (див. рис. 1.14, г). Визначення параметрів елементів цих схем полягає в наступному. За схемою на рис. 1.19 можна зняти вольт-амперну характеристику (ВАХ) реального джерела G , що має вихідні затискачі ab . Тобто, змінюючи опір R_H навантажувального реостата і вимірюючи силу струму I та напругу U , отримуємо ВАХ - залежність $U(I)$, яка показана на рис. 1.20 пунктиром. Тут позначені дві крайні точки: при $I=0$ - це напруга холостого ходу U_{xx} (XX - вимикач Q розімкнено); при $U=0$ - це струм короткого замикання I_k ($KЗ$ - $R_H=0$). При такій ВАХ джерело є нелінійним.

Для спрощення розрахунків ВАХ ідеалізують і отримують лінійну залежність $U(I)$, яка проходить через деякі характерні точки c і d на реальній кривій. На цій ВАХ також позначені уявні точки холостого ходу (U_{xx} , $I=0$) і короткого замикання (I_k , $U=0$). Таке джерело з прямолінійною ВАХ є лінійним.

Для лінеаризованої ВАХ можна записати формулу:

$$U = U_{xx} - R_0 I$$

де коефіцієнт R_0 визначається за відомими математичними правилами:

$$R_0 = \frac{U_{xx}}{I_k}$$

На цій основі, з використанням другого закону Кірхгофа, можна для кола за рис. 1.19 побудувати електричну схему заміщення з послідовним з'єднанням елементів E і D_0 , яка показана на рис. 1.21, де схема заміщення реального джерела виділена пунктиром. Тут E - ідеальне джерело ЕРС, причому $E=U_{xx}$, R_0 - внутрішній опір джерела, який вже визначено. Тепер очевидно, що для визначення параметрів схеми заміщення достатньо провести два досліди: холостого ходу та короткого замикання (дослід КЗ - спеціальний, бо просте замикання затискачів ab - це звичайно аварійний режим).

Стан кола за схемою заміщення вже можна описувати, використовуючи рівняння $U=E-R_0I$, що відповідає другому закону Кірхгофа (1.13).

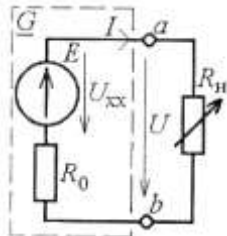


Рис. 1.21

Існує ще й паралельна електрична схема заміщення (див. рис. 1.14, г). Щоб дійти до неї, для ідеалізованої ВАХ (див. рис. 1.20) запишемо формулу прямої лінії так: $I=I_k-g_0U$. Ураховуючи 1-й закон Кірхгофа, на цій основі на рис. 1.22 будемо електричну схему заміщення, де J - ідеальне джерело струму, яке забезпечує незмінну силу струму I_k (він дорівнює струму КЗ); g_0 - внутрішня електрична провідність джерела, яка визначається так: $g_0 = \frac{I_k}{U_{xx}}$; g_0U - деякий уявний внутрішній струм джерела, що відвітвляється.

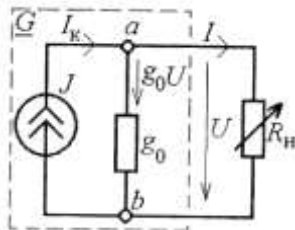


Рис. 1.22

Якщо діапазон можливих навантажень реального джерела відповідає зміні його струму від 0 до значення I_c (див. рис. 1.20), то заміна реальної ВАХ однією прямою лінією, яка проходить через точки c і d , буде в подальшому пов'язана зі значними похибками. Тому можна апроксимувати прямою лінією лише початкову ділянку ВАХ між точками x і c . У цьому випадку формула $U=E-R_0I$ і схема заміщення на рис. 1.21 зберігають свою силу тільки в межах цієї ділянки, а параметри, що входять до формули, мають наступне визначення: $E=U'_{xx}$; $R_0 = \frac{(U'_{xx}-U_c)}{I_c}$.

4. Структурні поняття електричних кіл

Структурно електричні кола складаються з віток, утворених джерелами електричної енергії, споживачами (приймачами) і проводами для передачі енергії та іншими об'єктами (див. рис. 1.2-1.6). Вішкою вважається та частина електричного кола, по якій проходить один і той же струм. Місця в колі, де сходяться три і більше вітки, називаються вузлами. Безперервний замкнений шлях по вітках електричного кола називається контуром.

Так, на рис. 1.18 є чотири вузла - a , b , c і d , хоча слід зауважити, що при розрахунках вузли a і b можна розглядати як єдиний вузол, так само, як і вузли c і d . Усе коло

складається із чотирьох віток, по кожній із яких проходить свій струм: I_G , I_1 , I_2 і I_3 . У ньому можна провести шість різних контурів, наприклад, 1-й контур утворюється вітками з елементами E_G , R_G , R_{FU1} , R_{EK} і R_{FU2} , 2-й - E_G , R_G , R_{FU1} , R_K і R_{FU2} , 3-й - R_{EK} і R_K тощо.

З'єднання елементів, що входять до складу однієї вітки, називається послідовним. По цим елементам, відповідно, проходить один і той же струм. Наприклад, у колі на рис. 1.18 послідовно з'єднані елементи E_G , R_G , R_{FU1} , R_{FU2} , ще послідовного з'єднання - це елементи E_{GB} і R_{GB} . З'єднання елементів або віток електричного кола, що знаходяться під однією і тією ж напругою, називається паралельним. Так, на рис. 1.18 елементи R_{EK} і R_K з'єднані паралельно один до одного і знаходяться під однією і тією ж напругою U_{GB} . У ширшому розумінні, якщо розглядати це електричне коло з позиції джерела E_G , то можна вважати паралельно з'єднаними всі три вітки зі струмами I_1 , I_2 і I_3 .

Відомі й інші типи з'єднання, наприклад, «трикутник» або «зірка», що буде розглянуто далі.

У залежності від способу з'єднання елементів, електричні кола поділяються на нерозгалужені (рис. 1.21) і розгалужені (див. рис. 1.15-1.18). У нерозгалуженому колі всі елементи увімкнені послідовно. У розгалуженому колі ділянки кола з'єднуються паралельно, змішано, «трикутником» або «зіркою».

Залежно від кількості ідеальних джерел кола підрозділяються на кола з одним або декількома джерелами. У залежності від кількості і способу увімкнення джерел і приймачів розрізняють прості і складні кола. До простих належать нерозгалужені і розгалужені кола з одним джерелом живлення, до складних - розгалужені кола з двома і більше ідеальними джерелами ЕРС, які вмикаються в різні вітки (див. рис. 1.18).

У схемі на рис. 1.18 реальне джерело електроенергії постійного струму подано із двома ідеальними елементами: ідеальним джерелом ЕРС E_a і внутрішнім опором D_c . Джерело віддає енергію, якщо напрямок струму і ЕРС в ньому збігаються. Напруга на затискачах реального джерела:

$$U_G = E_G - R_G I_G$$

тобто $U_G < E_G$.

Споживачі електричної енергії є активними, якщо до їхнього складу входять джерела ЕРС, зустрічні по відношенню до струму (електродвигуни, акумулятори, які заряджаються тощо) і пасивними - реостати, лампи розжарювання тощо. Так, на рис. 1.18 активним є споживач, зображений елементами E_{GB} і R_{GB} (вони замінили акумулятор, що заряджається), пасивними є споживачі, що подані елементами R_{FU1} , R_{FU2} , R_{EK} і R_K .

Напруга на затискачах активного приймача (споживача) електроенергії постійного струму:

$$U_{GB} = E_{GB} + R_{GB} I_3$$

тобто $U_{GB} > E_{GB}$.

Співвідношення напруги і струму на пасивних елементах підпорядковується закону Ома, наприклад, для елемента R_K :

$$U_{GB} = R_K I_2.$$

Тема 3. Електричне коло змінного струму

План

1. Співвідношення напруги і струму на ділянках кола з послідовним з'єднанням ідеальних елементів 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, а. Пояснимо порядок її побудови.

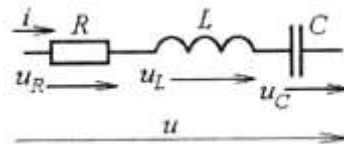


Рис. 1

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.

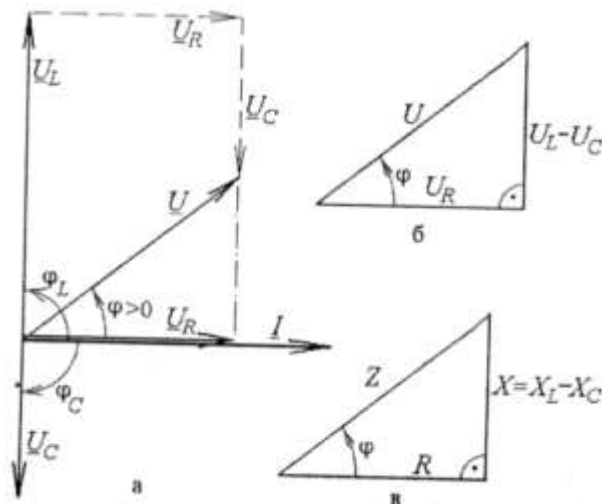


Рис. 2

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, в. 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

1. Способи включення навантаження у трифазну електричну мережу.
2. Основні розрахункові співвідношення у трифазному навантаженні.

1. Способи включення навантаження у трифазну електричну мережу

Різні способи включення навантаження у трифазну електричну мережу подані, де використовується чотирипровідна ЛЕП.

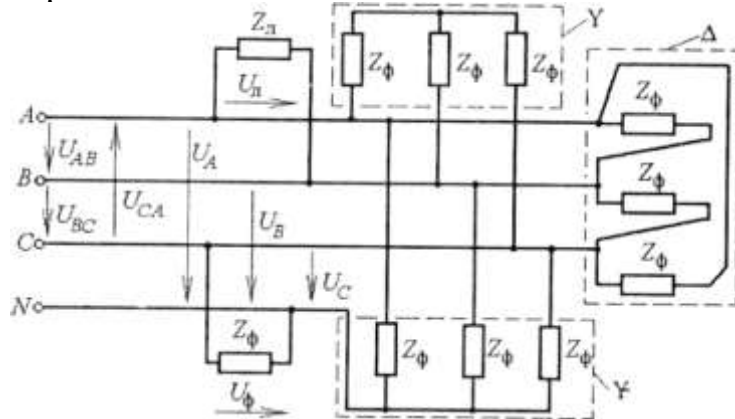


Рис. 1

1. **Однофазні приймачі** можуть бути включені двома способами:

- а) між якої-небудь лінією (на рисунку - лінія C) і нейтраллю N, тому приймач Z_ϕ отримає фазну напругу U_ϕ ;
- б) між двома лінійними проводами (в цьому разі взято лінії A і B), тому приймач Z_Δ отримує лінійну напругу U_Δ .

2. **Трифазні приймачі:** Z_ϕ , Z_ϕ , Z_ϕ - три однофазних приймача, об'єднані у спільне коло і тут можливі наступні варіанти схеми:

- а) зірка з нейтраллю Υ ;
- б) зірка без нейтралі Y ;
- в) трикутник Δ .

Кожний однофазний приймач характеризується, як відомо, повним опором фази:

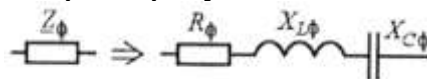


Рис. 2

$$Z_\phi = \sqrt{R_\phi^2 + (X_{L\phi} - X_{C\phi})^2}$$

а також фазовим зсувом

$$\varphi_\phi = \arctg \frac{X_{L\phi} - X_{C\phi}}{R_\phi}$$

Трифазне навантаження називається симетричним, якщо опори всіх трьох фазних приймачів ідентичні за величиною Z_ϕ і за характером, тобто за аргументом φ_ϕ . Якщо хоча б одна умова не виконується, навантаження називається несиметричним.

2. Основні розрахункові співвідношення у трифазному навантаженні

Схема зірка

Наведемо назви напруг і струмів, відображених на схемі:

U_A, U_B, U_C - фазні напруги в мережі - $U_{\phi м}$;

U_a, U_b, U_c - фазні напруги на навантаженні - $U_{\phi н}$;

I_A, I_B, I_C - лінійні струми - I_ϕ ;

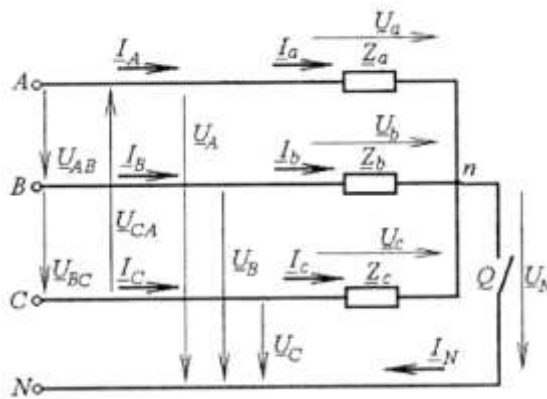


Рис. 3

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 $U_\text{л}$ ($U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\text{л}$), а також параметри кожної фази навантаження, тобто повні опори Z_a, Z_b, Z_c і фазові зсуви напруги і струму на них ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c .

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

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

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 $U_{\text{фп}} = U_{\text{фш}}$ 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 $Z_a = Z_b = Z_c = Z_\phi$ і фазних напруг $U_a = U_b = U_c = U_{\text{фн}}$, 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 $I_\text{л} = I_\phi$.

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 будемо 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 φ_a , φ_b , φ_c по відношенню до своєї фазної напруги. Для прикладу припустимо $\varphi_a > 0$, $\varphi_b = 0$, $\varphi_c < 0$.

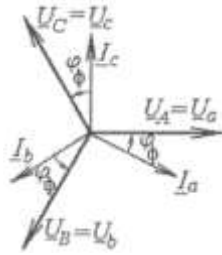


Рис. 4

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 $\underline{U}_a = U_{\text{фн}}$; $\underline{U}_b = U_{\text{фн}}e^{j120^\circ}$; $\underline{U}_c = U_{\text{фн}}e^{j240^\circ}$ і опорів фаз Z_a , Z_b , Z_c .

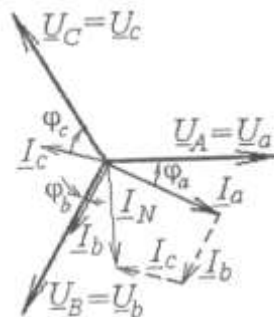


Рис. 5

Якщо при несиметричному навантаженні відбудеться обрив нейтрального проводу, то з'являється напруга «зміщення нейтралі» $\underline{U}_N$, 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 $\underline{U}_A = U_{\text{ФМ}}$; $\underline{U}_b = U_{\text{фн}}e^{j120^\circ}$; $\underline{U}_c = U_{\text{фн}}e^{j240^\circ}$ і провідностей фаз $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}$; $\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}$; $\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}$.

Тоді фазні напруги на приймачах на підставі другого закону Кірхгофа:

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

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.

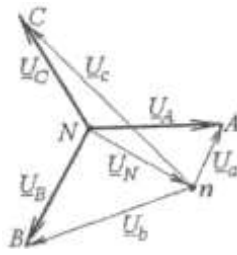


Рис. 6

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 ;

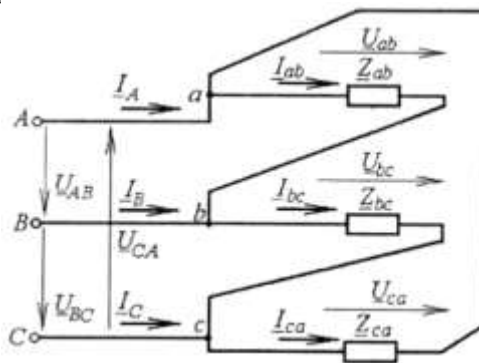


Рис. 7

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 $U_{\phi} = U_{\text{л}}$, 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 $I_A + I_{ab} + I_{ca} = 0$. 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 $\varphi_{\phi} < 0$.

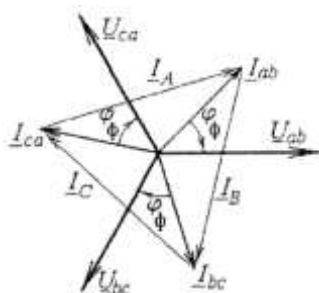


Рис. 8

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 лінійним і фазним струмами для трифазного симетричного навантаження за схемою «трикутник»:

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

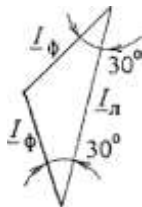


Рис. 9

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:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}$$

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

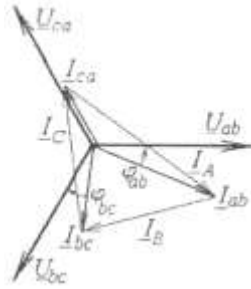


Рис. 10

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:

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

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:

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

Тема 5. Трансформатори

1. Класифікація трансформаторів
2. Автотрансформатори.
3. Трифазні трансформатори.
4. Вимірювальні трансформатори.

1. Класифікація трансформаторів

Сфера використання трансформаторів дуже широка. Призначення трансформатора визначає його конструкцію. І в цьому зв'язку трансформатори підрозділяють на такі основні види.

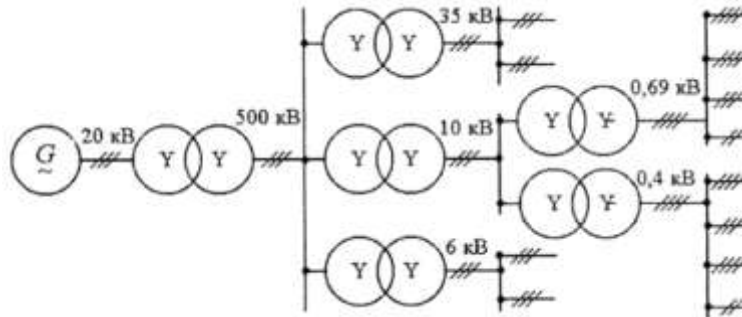


Рис. 1

1. Силкові трансформатори - це основний вид, і який застосовується в системах передачі і розподілу енергії, для установок з перетворювачами струму, в колах управління електроприводами, в мережах місцевого освітлення. На рис. 1 показано багатоступінчасту систему перетворення електроенергії, що виробляється трифазним синхронним генератором С з лінійною напругою 20 кВ, за допомогою силових трансформаторів.

2. Силкові спеціальні - пічні, зварювальні, які мають високі значення струмів вторинних обмоток.

3. Вимірювальні - для вмикання електричних вимірювальних приладів у мережі високої напруги або сильного струму.

4. Випробувальні - для отримання надвисоких напруг.

5. Радіотрансформатори - у пристроях радіо- і провідного зв'язку, в системах автоматики і телемеханіки тощо.

6. Повітряні (без осердя) - для високих частот: від 100 кГц і вище.

Є також спеціальний тип трансформатора - автотрансформатор, в якому обмотка НН є частиною обмотки ВН.

Трансформатори одного призначення можуть відрізнятися:

а) за видом охолодження - з повітряним або олійним (масляним) охолодженням: у другому випадку застосовується спеціальна трансформаторна олія (масло), яка знаходиться в баці з трансформатором;

б) за числом фаз, що трансформуються - однофазні, трифазні або багатофазні;

в) за формою магнітопроводу: стрижневі, броньові, броньострижневі, тороїдні;

г) за числом обмоток - двохобмоткові і багато-обмоткові (одна первинна і дві або більше вторинних обмоток на різні напруги);

г) за конструкцією обмоток вони можуть бути концентричними або такими, що чергуються.

Трансформатори мають умовне буквено-числове позначення: О - однофазний; Т - трифазний (для автотрансформаторів спочатку ставиться А); М - олійне (масляне)

охолодження; Д - повітряне дуття; МЦ - примусова циркуляція олії (масла); С - повітряне охолодження; СД - повітряне з дуттям.

Після букв ідуть два числа з дробом: номінальна потужність (кВА) / напруга обмотки ВН (кВ), потім рік конструкторської розробки, наприклад: ТМ-100/10-96.

На щитку трансформатора вказують його номінальні дані:

1. Напруги (лінійні) - вища і нижча. Стандартними є значення напруг: для трансформаторів електростанцій і підстанцій 1200, 787, 525, 347, 242, 165, 121, 38,5 кВ (1150, 750, 500, 330, 220, 150, 110, 35 кВ); на підстанціях підприємств 6, 10, 35 кВ; у розподільних мережах (лінійне/фазне): 0,69/0,4; 0,4/0,23; 0,23/0,133кВ (660/380; 380/220; 220/127 В).

2. Номінальна повна потужність (ВА або кВА).

3. Лінійні струми при номінальній потужності (А). Вказуються також частота (Гц); число фаз; схема і група з'єднань обмоток (для трифазного); напруга короткого замикання; режим роботи - короткочасний або тривалий; спосіб охолодження.

Виводи обмотки вищої напруги позначають: А - початок, Х - кінець; обмотки нижчої напруги - а - початок, х - кінець, у трифазних - АХ, ВУ, СЗ, ах, бу, cz.

2. Автотрансформатори

Схематично автотрансформатор зображено і він відрізняється від звичайного трансформатора тим, що обмотка НН з кількістю витків w_2 є частиною обмотки ВН з кількістю витків w_1 . Таким чином, обмотки мають електричний зв'язок.

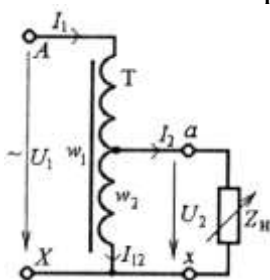


Рис. 2

Співвідношення напруг, підпорядковується коефіцієнту трансформації.

Подібно рівнянню МДС, тут можна записати $I_{10}\omega = I_1(\omega_1 - \omega_2) + I_{12}\omega_2$ і, якщо знехтувати малою величиною струму НХ I_{10} , то для діючого значення струму на ділянці з кількістю витків ω_2 можна приблизно отримати

$$I_{12} \approx \left(\frac{w_1}{w_2} - 1 \right) I_1$$

Якщо це порівняти з виразом для струмів звичайного трансформатора, то можна зробити висновок, що тепер струм у вторинній частині обмотки трансформатора суттєво менший, ніж струм I_2 у навантаженні.

У результаті, використання автотрансформатора дозволяє зменшити електричні втрати потужності і витрати провідника обмотки (замість двох на ділянці з ω_2 тепер одиничний провідник).

Автотрансформатор можна вмикати як за схемою зниження напруги, так і за схемою її підвищення, струми, природно, мають зворотне співвідношення. Стрілка на одному із виводів відповідає рухомому контакту, чим забезпечується можливість регулювання вторинної напруги.

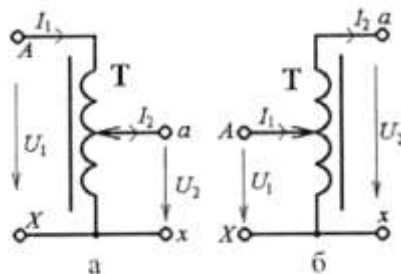


Рис. 3

Поряд із перевагами, автотрансформатори мають і недолік. Так, при обриві спільної ділянки обмоток більш висока напруга U безпосередньо попадає на навантаження Z_u , яке на цю напругу, як правило, не розраховане. Результатом може бути пошкодження цього навантаження і небезпека для обслуговуючого персоналу.

3. Трифазні трансформатори

Оскільки виробництво і передача електроенергії на великі відстані, а також її використання у трифазних асинхронних і синхронних двигунах, в установках з трифазними випрямлячами і в інших випадках здійснюються у вигляді трифазної системи змінного струму, то для такої системи необхідно мати трифазні трансформатори.

Трансформування енергії трифазної системи струмів можна здійснювати трьома однофазними трансформаторами або спеціальним трифазним трансформатором, який виходить дешевше і менших габаритів. Конструкція трифазного трансформатора дана, де на кожний зі стрижнів А, В і С осердя надівають обмотки ВН і НН, що належать до однієї відповідної фази.

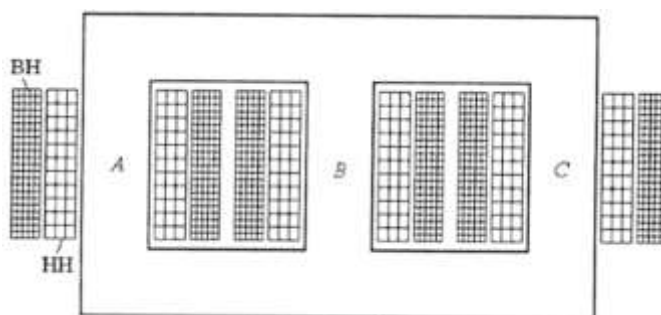
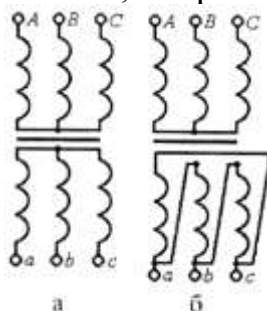


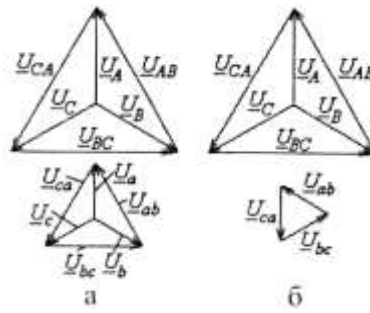
Рис. 4

Як первинні, так і вторинні обмотки можуть з'єднуватися в трикутник і «зірку», схема «зірка»-«зірка» Y/Y ; б) схема «зірка»-«трикутник» Y/Δ . У «зірці» може бути виведена і нейтральна точка, і тоді отримаємо, наприклад, варіант Y/Y .



5

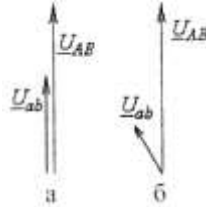
У залежності від схеми з'єднання лінійні напруги на вихідних затискачах вторинної обмотки можуть збігатися за фазою з однойменними лінійними напругами первинної обмотки або бути зсунутими за фазою на 30° .



6

Відповідне взаємне положення векторів лінійних напруг показано на рис. 9.18.

У цьому зв'язку введено поняття групи з'єднань. Використовуючи аналогію зі стрілками годинників, варіант, а і, відповідно, схему на рис. 9.16, а віднесли до нульової групи (схоже на 0 годин),. Можливі й інші варіанти.



7

4. Вимірювальні трансформатори

Ці трансформатори застосовують для розширення меж вимірювання вимірювальних приладів змінного струму, що особливо необхідно при вимірюванні дуже великих напруг і струмів. Вимірювальні трансформатори дозволяють також повністю ізолювати ці прилади від кола високої напруги, в якому здійснюється вимірювання.

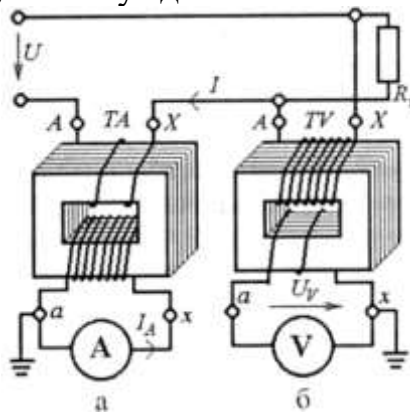


Рис. 8

Трансформатор струму (ТА) використовують для вмикання амперметра і послідовних кіл інших вимірювальних приладів. Ці трансформатори працюють у режимі, близькому до КЗ, і в них не можна розмикати вторинну обмотку, оскільки в цьому випадку на її затискачах формується недопустимо висока напруга.

Трансформатор напруги (ТУ) використовують для вмикання вольтметрів і паралельних кіл напруги інших приладів.

Умовні позначення і маркування затискачів ТА і ТУ.

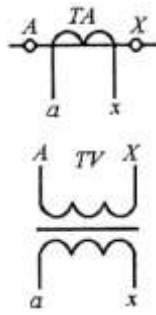


Рис. 9

При вимірюваннях покази приладів I_A і U_V а належить множити на номінальні коефіцієнти трансформації k_I для ТА і k_U для ТУ. У підсумку струм і напруга в мережі, яка контролюється:

$$I = k_I I_A; U = k_U U_V.$$

Вимірювальні прилади, що працюють у комплекті з трансформаторами, градуюють у масштабі одиниць первинних величин, що вимірюються.

Тема 6. Асинхронні електродвигуни

1. Електромагнітний момент асинхронного двигуна

Електромагнітний момент асинхронного двигуна може бути виражений через електромагнітні величини машини. Так $M_{em} = P_{em}/\omega_1$, де $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1/p$ – кутова частота обертання магнітного поля, скориставшись, що $P_{em} = m_2 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$, а $E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_{max} \cdot W_2 \cdot k_{o62}$ і, врахувавши що $4,44 = 2\pi/\sqrt{2}$, отримаємо:

$$M_{em} = p \cdot m_2 \cdot W_2 \cdot k_{o62} \cdot \Phi_{max} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 / \sqrt{2},$$

або, замінивши $p \cdot m_2 \cdot W_2 \cdot k_{o62} = k_m$ і $\Phi_{max}/\sqrt{2} = \Phi$, кінцеву формулу

$$M_{em} = k_m \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

Природа електромагнітного моменту асинхронного двигуна та машини постійного струму однакова, так як добуток $I_2 \cdot \cos \varphi_2$ є активною складовою струму ротора. Отримана формула, пояснюючи природу електромагнітного моменту, зручна лише для якісного аналізу робочого процесу асинхронної машини. Її недоліком є те, що момент визначається як функція двох величин, які залежать від навантаження: I_2 та $\cos \varphi_2$

Тому виводиться інша формула, у якій електромагнітний момент двигуна виражається через параметри схеми заміщення

$$M_{em} = P_{e2}/(s \cdot \omega_1) = m_1 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2' / (s \cdot \omega_1).$$

Підставивши, визначений за схемою заміщення зведений струм I_2' та значення $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1/p$ отримаємо:

$$M_{em} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot R_2^1 / s}{2\pi \cdot f_1 \cdot [(R_1 + R_2^1/s)^2 + (X_1 + X_2^1)^2]}.$$

При малих ковзаннях ($s \ll 1$) у квадратних дужках знаменника можна знехтувати всіма величинами, крім $(R_2'/s)^2$, і тому:

$$M_{em} \approx \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{2\pi \cdot f_1 \cdot R_2^1} \cdot s,$$

тобто при малих ковзаннях електромагнітний момент пропорційний ковзанню і залежність $M_{em} = \varphi(s)$ має лінійний характер. При ковзаннях близьких до одиниці, або й більших одиниці (гальмівний режим) в цих дужках можна знехтувати активними опорами обмоток R_1 та R_2' у порівнянні з індуктивними X_1 та X_2' , і тоді

$$M_{em} \approx \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot R_2^1}{2\pi \cdot f_1 \cdot (X_1 + X_2^1)^2} \cdot 1/s.$$

Звідси випливає, що при значних ковзаннях момент зворотно пропорційний ковзанню і крива $M_{em} = f(s)$ має гіперболічний характер. При зміні ковзання в широких межах, і $U_1 = \text{const}$, крива $M_{em} = f(s)$ має вигляд зображений на (рис. 4.18).

Як впливає при $s = 0$ та $s = \pm 1$ електромагнітний момент машини рівний нулю, отже функція має *максимальні точки*. Ковзання, що відповідає цим точкам називається *критичним ковзанням* $s_{кр}$. Величину $s_{кр}$ можна визначити, взявши першу похідну dM_{em}/ds і прирівнявши її до нуля:

$$s_{кр} = \pm \frac{R_2^1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2^1)^2}}.$$

Підставивши (4.59) в (4.58), отримаємо значення максимального моменту $M_{макс}$:

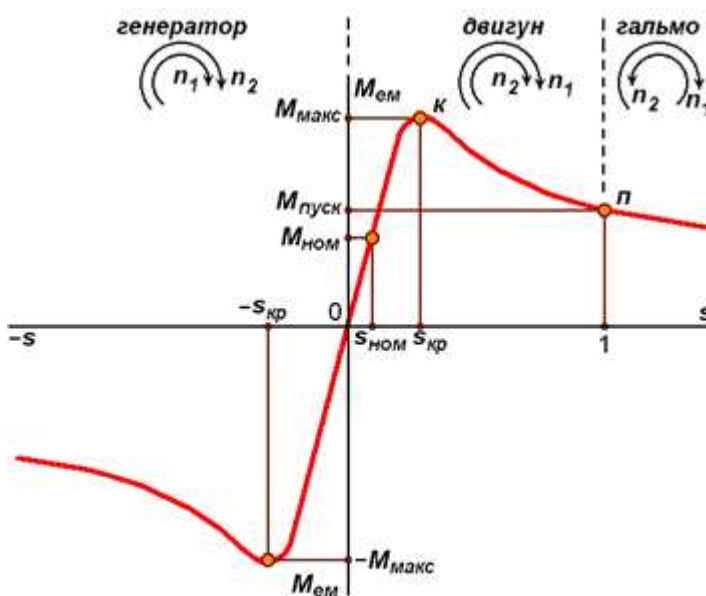


Рисунок 4.18 – Залежність $M_{em} = f(s)$ асинхронної машини

$$M_{макс} = \pm \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{4\pi \cdot f_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2^1)^2}]}.$$

Знак плюс відповідає режиму двигуна, а мінус – генератора.

Для асинхронних двигунів загального призначення активний опір обмотки статора набагато менший ніж сума індуктивних опорів $R_1 \ll (X_1 + X_2')$, тому, нехтуючи опором R_1 , критичне ковзання можна визначати приблизно:

$$s_{кр} \approx \pm R_2' / (X_1 + X_2'),$$

аналогічно і приблизне значення максимального моменту:

$$M_{макс} \approx m_1 \cdot p \cdot U_1^2 / [4\pi \cdot f_1 \cdot (X_1 + X_2')].$$

Слід зазначити, що максимальний момент генераторного режиму $M_{макс г}$, дещо більший, ніж режиму двигуна $M_{макс д}$ через зменшення в цьому режимі знаменника вказаної формули ($M_{макс г} > M_{макс д}$).

$$M_{\text{пуск}} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot R_2^1}{2\pi \cdot f_1 \cdot [(R_1 + R_2^1)^2 + (X_1 + X_2^1)^2]}.$$

Досить часто, замість залежності $M_{em} = f(s)$ користуються механічною характеристикою, тобто залежністю $n_2(s) = f(M_{em})$ (рис. 4.19).

2. Робочі та механічні характеристики асинхронного двигуна

На (рис. 4.18 та рис. 4.19) механічна характеристика двигуна має дві ділянки. Перша – Ok є ділянкою *стійкої роботи* машини, тому що зростання навантаження (збільшення s та зниження n_2) приводить до збільшення моменту, який розвиває двигун, а отже дає йому змогу обертати збільшене навантаження.

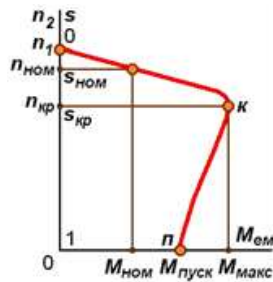


Рисунок 4.19 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

На другій ділянці характеристики – kp , зростання навантаження приводить до зниження моменту двигуна, тому ця ділянка називається *ділянкою нестійкої роботи*. Відношення максимального моменту, який розвиває двигун, до номінального ($\lambda = M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$) називається *перевантажувальною спроможністю* двигуна. Для двигунів загального призначення $\lambda = (1,7 - 2,5)$.

Як правило, номінальний момент машини менший від пускового, що дозволяє здійснити пуск двигуна з номінальним навантаженням, цю властивість двигуна називають *пусковою спроможністю* $\square = M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$, звичайно $1,1 - 2$).

Застосування формули для розрахунків механічної характеристики асинхронних двигунів не завжди можливе, тому що параметри схеми заміщення двигунів звичайно у каталогах і довідниках не задаються, тому найчастіше користуються спрощеною формулою моменту. В основу цієї формули покладено припущення, що активний опір обмотки статора малий у порівнянні з індуктивним, тому приймається $R_1 \approx 0$; при цьому

$$M_{em} \approx M_{\text{макс}} \cdot \frac{2}{s/s_{kp} + s_{kp}/s},$$

де

$$s_{kp} = s_{\text{ном}} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$$

– критичне ковзання визначене через перевантажувальну здатність двигуна та номінальне ковзання $s_{\text{ном}}$.

Робочі характеристики асинхронного двигуна (рис. 4.22) уявляють собою графічні вирази залежностей частоти обертання n_2 , коефіцієнта корисної дії $\square$, корисного моменту (моменту на валу) M_2 , коефіцієнта потужності $\cos \phi_1$ від корисної потужності на валу P_2 при $U_1 = U_{\text{ном}} = \text{const}$ і $f_1 = f_{\text{ном}} = \text{const}$. Досить часто до цих характеристик

додаються залежності струму статора I_1 та потужності P_1 , що споживаються з мережі від потужності P_2 .

Швидкісна характеристика $n_2 = f(P_2)$. Частота обертання ротора асинхронного двигуна може бути визначена, згідно з (4.3) та (4.49):

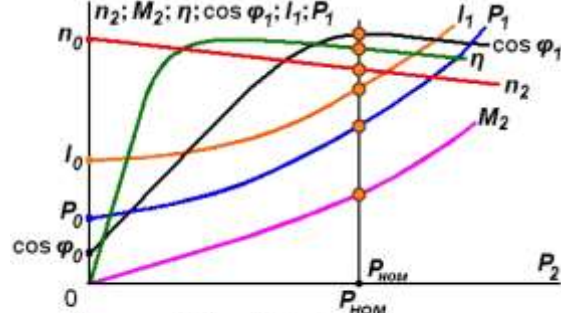


Рисунок 4.22 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - P_{e2}/P_{em}),$$

тобто, частота обертання ротора пов'язана з відношенням електричних втрат в обмотці ротора до електромагнітної потужності P_{em} .

Нехтуючи електричними втратами в роторі при НХ ($P_{e2} \approx 0$), можна вважати, що частота обертання ротора при НХ приблизно рівна синхронній частоті

($n_0 \approx n_1$). При зростанні навантаження на валу електричні втрати P_{e2} будуть зростати, тому частота обертання знижується, а отже крива $n_2 = f(P_2)$ уявляє собою криву, незначно нахилену до осі абсцис. Якщо ж активний опір обмотки ротора R_2' збільшити, то відповідно зросте і кут нахилу кривої частоти обертання до осі абсцис. В цьому випадку зміна частоти обертання, при коливаннях навантаження, зростає.

Моментна характеристика $M_2 = f(P_2)$. Залежність корисного моменту на валу двигуна M_2 від корисної потужності P_2 визначається виразом:

$$M_2 = P_2 / \eta = 60 P_2 / 2 \pi n_2 = 9,55 P_2 / n_2.$$

Із цього випливає, що при $n_2 = \text{const}$ графік $M_2 = f(P_2)$ є пряма, що проходить через початок координат. Але в асинхронному двигуні зростання P_2 викликає незначне зменшення частоти обертання, тому корисний момент на валу зростає дещо швидше, ніж навантаження, а отже графік $M_2 = f(P_2)$ має криволінійний вигляд.

Залежність $\eta = f(P_2)$. При НХ асинхронний двигун ніякої корисної роботи не виконує, тому залежність $\eta = f(P_2)$ розпочинається з нуля. Якщо збільшувати навантаження до точки КЗ, то в цій точці двигун також не буде виконувати корисної роботи, і його ККД буде знову дорівнювати нулю. Між цими двома точками ККД зростає до максимального значення (0,8 – 0,95), при навантаженнях близьких (0,7 – 0,8) $P_{ном}$, при яких змінні втрати двигуна рівні постійним.

Залежності $I_1, P_1 = f(P_2)$. Струм I_1 та потужність P_1 , що споживаються з мережі, при НХ називаються відповідно струмом та втратами НХ. Струм I_0 , як і у трансформатора, є намагнічувальним і створює основне магнітне поле. Але, на відміну від трансформатора, через наявність повітряного зазору в магнітній системі, він набагато більший, ніж у трансформатора, і складає (20 – 50) % від номінального струму $I_{1ном}$.

Потужність P_0 витрачається на покриття механічних $P_{мех}$, магнітних $P_{маг}$, та електричних втрат в обмотці статора від струму НХ I_0 .

При зростанні навантаження струм I_1 і потужність P_1 зростають, при цьому P_1 зростає дещо швидше, ніж струм I_1 , через зростання коефіцієнта потужності.

Залежність $\cos \phi = f(P_2)$. Шляхи підвищення коефіцієнта потужності. В зв'язку з тим, що магнітний потік створюється реактивною (індуктивною) складовою струму I_1 ,

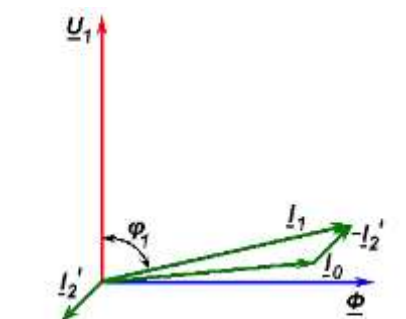


Рисунок 4.23 – Векторна діаграма асинхронного двигуна при незначному навантаженні

коефіцієнт потужності асинхронного двигуна менше одиниці за рахунок споживання цього струму з мережі. Найменше значення $\cos \varphi_1$ буде мати при НХ, це пояснюється тим, що намагнічувальний струм I_0 , практично, залишається незмінним при будь-якому навантаженні. Тому при малих навантаженнях струм статора майже повністю складається з реактивного струму. В результаті зсув струму обмотки статора $\underline{I}_1$ відносно напруги мережі $\underline{U}_1$ виявляється досить значним ($\varphi_1 \approx \varphi_0$) лиш дещо менший від 90° (рис. 4.23), отже $\cos \varphi_0 \approx (0,1 - 0,2)$.

При зростанні навантаження на валу машини, зростає активна складова частина струму I_1 і коефіцієнт потужності збільшується, досягаючи максимального значення (0,8 – 0,9) при навантаженні близькому до номінального. Подальше збільшення навантаження викликає зниження $\cos \varphi_1$. Це пояснюється зростанням індуктивного опору обмотки ротора ($X_{2s} = X_2 \cdot s$) за рахунок збільшення ковзання, а отже, і частоти струму в роторі.

Слід зазначити, що коефіцієнт потужності є важливим техніко-економічним показником роботи електричної мережі, а так як асинхронні двигуни це основні споживачі електричної енергії, то підвищення $\cos \varphi_1$ асинхронних двигунів відповідно веде до підвищення ефективності роботи мережі. При правильному виборі потужності двигуна (перший шлях підвищення $\cos \varphi_1$), він завжди, або більшу частину часу, буде працювати з навантаженням близьким до номінального, а отже, матиме найбільше значення коефіцієнта потужності. Іншим шляхом підвищення $\cos \varphi_1$, якщо здебільшого двигун працює недовантаженим, є зниження напруги, що підводиться до обмотки статора. При зниженні напруги, згідно з законом Ома, пропорційно знижується струм. Враховуючи, що навантаження залишилось незмінним, незмінним (навіть дещо зросте, див. 4.4.3) буде і активний струм, тобто, зниження струму повністю відбувається за рахунок реактивної частини і, як наслідок, коефіцієнт потужності зростає. Для двигунів, обмотка статора яких сполучена за схемою трикутник, можна здійснити перемикання на зірку. Це дозволить знизити фазну напругу та струм в $\sqrt{3}$ раз. При цьому магнітний потік, що створюється обмоткою статора, а отже і намагнічувальний струм зменшаться приблизно в $\sqrt{3}$ раз. Крім цього дещо зросте активна складова струму обмотки статора. Все це сприяє підвищенню $\cos \varphi_1$ (рис. 4.24).

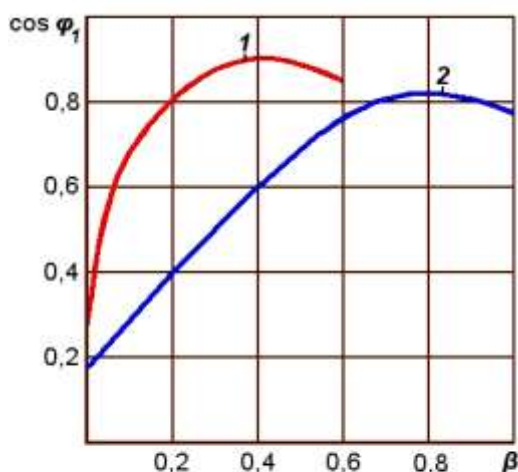


Рисунок 4.24 – Залежність $\cos \varphi_1$ від навантаження при сполученні обмотки статора асинхронного двигуна зіркою (1) та трикутником (2)

Робочі характеристики асинхронних двигунів будуються за даними, які можна отримати при безпосередньому навантаженні двигуна електромагнітним чи механічним гальмом, або генератором. Цей шлях побудови характеристик застосовується для двигунів відносно невеликої потужності до (10 – 15) кВт.

Для більш потужних двигунів суттєво ускладнюється задача навантаження двигуна, зростають непродуктивні витрати електроенергії, тому застосовується *непрямий метод*, використання якого не обмежується величиною потужності. Цей метод полягає в тому, що за даними двох дослідів – НХ та КЗ, проводять аналітичні розрахунки характеристик. При цьому можуть будуватися, так звані, *кругові діаграми*,

за якими і визначаються робочі характеристики. Слід зазначити що побудова кругових

діаграм досить громіздка, а точність розрахунків при цьому суттєво залежить від точності вимірювання відрізків діаграми. Тому найчастіше в сучасній конструкторській та інженерній практиці розрахунки для побудови характеристик проводяться на ЕОМ.

3. Пуск та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

Пуску та регулюванню частоти обертання асинхронних двигунів приділяється значна увага в сучасних електроприводах. Пов'язано це перш за все з тим, що маючи просту конструкцію та досить високу надійність в експлуатації, ці двигуни складають основну частину парку електродвигунів, що використовуються у всіх сферах виробництва. Простота і економічність пуску та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів дозволили б, якби мали місце, суттєво знизити експлуатаційні втрати і підвищити ефективність виробництва.

Пускові властивості асинхронних двигунів

Пуск асинхронного двигуна супроводжується перехідним процесом, зумовленим переходом ротора, та механічно пов'язаних з ним частин виконавчого механізму, із нерухомого стану до стану рівномірного обертання, коли обертовий момент двигуна урівноважується сумою гальмівних моментів, що діють на ротор двигуна.

Пускові властивості двигуна визначаються, в першу чергу, значенням пускового стуму або його кратністю $i_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$ та значенням пускового моменту $M_{\text{пуск}}$ чи пусковою спроможністю μ . Двигун, що має хороші пускові властивості, розвиває значний пусковий момент при порівняно незначному пусковому струмі. На жаль, отримати таке сполучення пускових параметрів у асинхронному двигуні, практично, неможливо.

ПУСК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ФАЗНИМ РОТОРОМ

Наявність контактних кілець у двигуна з фазним ротором дозволяє ввімкнути в коло обмотки ротора пускові резистори. При цьому активний опір кола ротора збільшується до значення $R_{2\text{пуск}}' = R_2' + R_{\delta}'$, де R_{δ}' – значення додаткового пускового опору зведеного до обмотки статора.

Як уже відзначалось, можна підібрати такий додатковий пусковий опір, при якому пусковий момент буде дорівнювати моменту максимальному (R_{23}' на рис. 4.21). Величину цього опору можна визначити, підставивши в (4.61) $s_{\text{кр}} = 1$

$$s_{\text{кр}} = (R_2' + R_{\delta.\text{макс}}')/(X_1 + X_2') = 1,$$

де $R_{\delta.\text{макс}}'$ – зведений до обмотки статора додатковий пусковий опір, при якому $M_{\text{пуск}} = M_{\text{макс}}$. Таким чином,

$$R_{2\text{н.м}}' = R_2' + R_{\delta.\text{макс}}' = X_1 + X_2',$$

де $R_{2\text{н.м}}'$ – зведений до обмотки статора пусковий опір кола обмотки ротора, при якому $M_{\text{пуск}} = M_{\text{макс}}$. При $R_{2\text{н.м}}' > (X_1 + X_2')$ пусковий момент двигуна зменшується.

Вибираючи додатковий пусковий опору R_{δ}' , слід виходити з умов пуску двигуна: якщо двигун вмикається при значному моменті навантаження на валу, додатковий пусковий опір вибирається таким, щоб забезпечити найбільший пусковий момент, тобто

$R_d' = R_{d\max}'$. Якщо двигун вмикається при незначному моменті навантаження на валу, тобто коли пусковий момент двигуна не має вирішального для пуску значення, виявляється доцільним додатковий пусковий опір $R_{2\text{пуск}}'$ вибрати більшим, ніж той, при якому $M_{\text{пуск}} = M_{\text{макс}}$, тобто $R_{2\text{пуск}}' > (X_1 + X_2)$. В цьому випадку пусковий момент буде меншим від $M_{\text{макс}}$, або навіть $M_{\text{ном}}$ (опір R_{24}' на рис. 4.21), але і пусковий струм значно знизиться.

На (рис. 4.25) зображена схема ввімкнення пускових реостатів в коло ротора та поданий графік зміни пускового моменту асинхронного двигуна з фазним ротором при

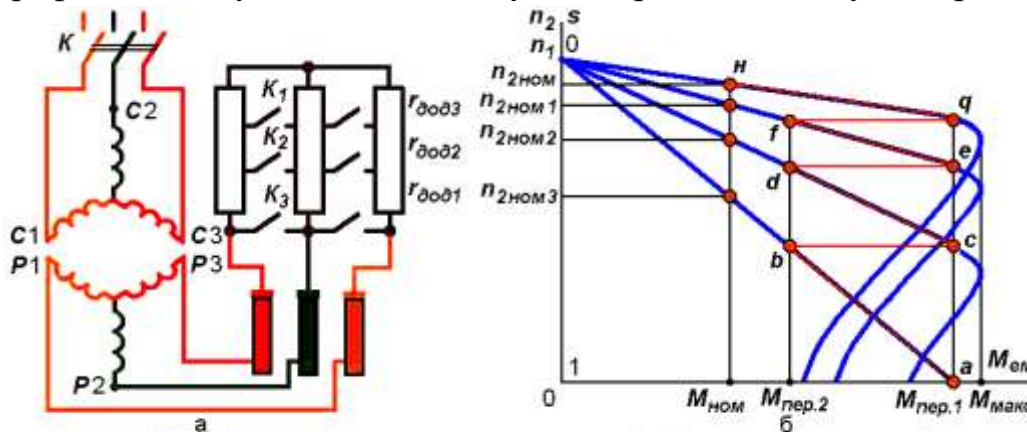


Рисунок 4.25 – Схема ввімкнення пускових реостатів (а) у коло ротора та побудова пускових характеристик (б) асинхронного двигуна з фазним ротором

трьох значеннях додаткових опорів. Так, в початковий момент пуску (всі додаткові опори r_{dod1} , r_{dod2} та r_{dod3} ввімкнені в коло ротора – замкнені контакти K , а контакти $K1 - K3$ розімкнені) пусковий момент рівний $M_{\text{пер1}}$ (точка a рис. 4.25, б). В процесі розгону двигуна, його момент знижується до моменту $M_{\text{пер2}}$ (точка b), коли вмикаються контакти $K1$, опір в колі ротора знижується. Частота обертання ротора не встигає змінитися, як двигун переходить на іншу реостатну характеристику в точку c , і пусковий момент знову досягає величини $M_{\text{пер1}}$. Після нового зниження моменту до $M_{\text{пер2}}$ (точка d), вмикаються контакти $K2$ і двигун переходить в точку e і так далі, доки двигун не вийде на природну характеристику, по якій досягне частоти обертання $n_{\text{ном}}$ (точка n). В цій точці момент, що розвиває двигун, урівноважується моментом навантаження $M_{\text{ном}}$. Якщо при розгоні двигуна не увімкнуться контакти $K1$, $K2$ чи $K3$, двигун по відповідній характеристиці досягне частоти $n_{\text{ном3}}$, $n_{\text{ном2}}$ чи $n_{\text{ном1}}$ і буде працювати саме з цією частотою обертання, тому що в цих точках $M_{\text{ем}}$ двигуна рівний моменту навантаження $M_{\text{ном}}$.

Таким чином, в асинхронних двигунах з фазним ротором забезпечується найбільш оптимальне співвідношення між пусковим моментом і пусковим струмом: значний пусковий момент при невеликому струмі – не більше ніж (2 – 3) рази від номінального значення струму. Недоліком такого пуску є деяка складність і неекономічність пускової операції. Останнє викликається необхідністю застосування додаткових опорів з невиробничими втратами електроенергії при їх нагріванні.

ПУСК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Прямий пуск. Цей спосіб пуску є найбільш поширеним, тому що відрізняється простотою: обмотка статора вмикається до мережі, наприклад ввімкненням рубильника K (рис. 4.26, а) або іншого електричного апарата, але має суттєвий недолік: в момент ввімкнення двигуна до мережі в обмотці статора пусковий струм $I_{\text{пуск}}$ перевищує в (5 – 7) разів номінальний струм при відносно незначному пусковому моменті $M_{\text{пуск}}$ (рис. 4.26, б).

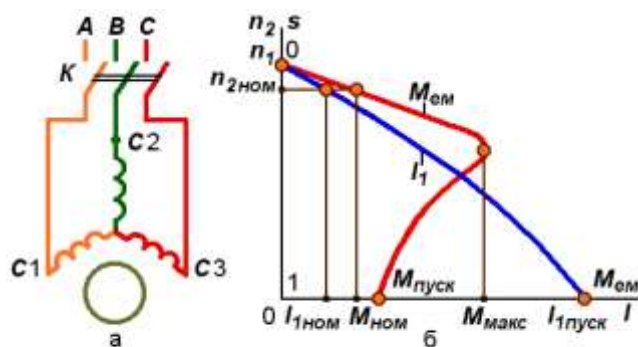


Рисунок 4.26 – Схема прямого пуску (а) та пускові характеристики (б) асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

статора. Тобто значний пусковий струм не завдає відчутної шкоди самому двигуну. Інша річ його дія на мережу живлення, де значний кидок струму може викликати падіння напруги U_1 , особливо, якщо потужність мережі недостатня (потужність мережі визначається потужністю знижувального трансформатора дільничної або цехової підстанції). Щоб забезпечити стабільність роботи електричної мережі при пусках асинхронних двигунів значної потужності виникає необхідність зниження пускового струму. Так як ввімкнути в коло ротора такого двигуна додаткові реостати неможливо, доводиться знижувати напругу, яка підводиться до статорної обмотки.

Пуск на зниженій напрузі. У відповідності з (4.69) пусковий струм двигуна пропорційний підведеній напрузі U_1 , зниження якої викликає відповідне зменшення пускового струму. Існує кілька способів зниження напруги, що підводиться до асинхронного двигуна.

Для асинхронних двигунів, що працюють при сполученні обмотки статора за схемою

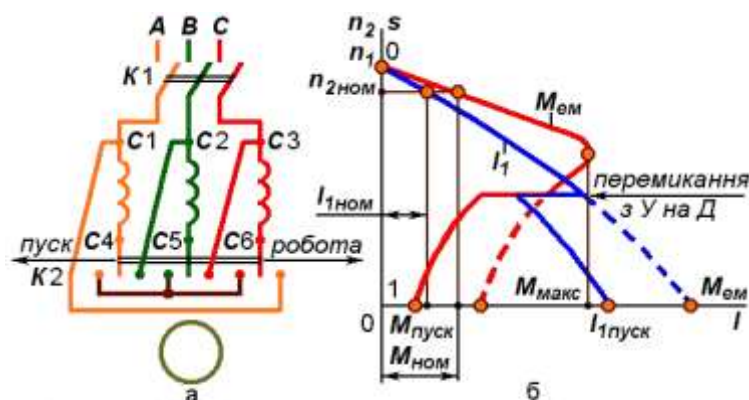


Рисунок 4.27 – Схема пуску перемиканням обмотки статора асинхронного двигуна з зірки на трикутник (а) та графіки зміни струму і моменту при такому пуску (б)

трикутник, можна застосувати пуск перемиканням із зірки на трикутник (рис. 4.27, а). На момент ввімкнення двигуна вимикачем $K1$, обмотка статора сполучується за схемою зірка (перемикач $K2$ у положенні “пуск”). При цьому фазна напруга і, відповідно, фазний струм обмотки статора знижуються в $\sqrt{3}$ раз (рис. 4.27, б). Крім цього, при сполученні в зірку, лінійний струм дорівнює фазному, в той час як при сполученні цих обмоток за трикутником лінійний струм більший від фазного в $\sqrt{3}$ раз. Відповідно, вмикання на час пуску обмотки статора за зіркою, дає зниження лінійного струму в $(\sqrt{3})^2 = 3$ рази. Після розгону двигуна до стабільної частоти обертання, двигун перемикається на трикутник (перемикач $K2$ переводиться у положення “робота”).

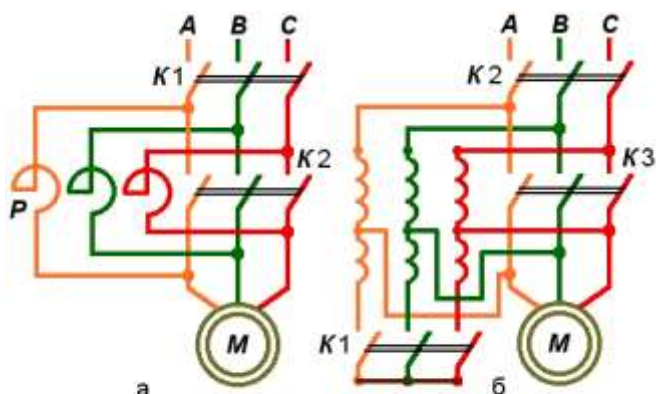


Рисунок 4.28 – Схеми реакторного (а) та автотрансформаторного (б) способів пуску асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором

Розглянутий спосіб має два недоліки: по-перше, його можна застосувати лише тоді, коли звичайно двигун працює за сполученням

обмотки статора схемою трикутник; по-друге, що суттєвіше, зниження напруги в $\sqrt{3}$ раз викликає, згідно (4.63), зниження пускового моменту в 3 рази (рис. 4.27, б), що практично унеможлиблює пуск двигуна під навантаженням.

Досить поширеним є реакторний пуск – спосіб пуску зі зниженням напруги за допомогою реакторів (реактивних котушок – дроселів) (рис. 4.28, а). При такому способі пуску напруга $\underline{U}_d$, що підводиться до двигуна під час пуску, буде меншою ніж напруга мережі, на величину падіння напруги на опорі реактора $\underline{U}_d = \underline{U}_1 - j\underline{I}_{пуск} X_p$, де X_p – індуктивний опір реактора. Пускові операції реакторного пуску нескладні: вмикаються контакти **K1** і двигун на зниженій напрузі розганяється до частоти обертання близької номінальній, після цього вмикаються контакти **K2**, вимикаючи реактор. Недолік цього способу, як і попереднього – квадратичне зниження пускового моменту в порівнянні зі зниженням напруги та струму.

При автотрансформаторному пуску – пуску двигуна через знижувальний автотрансформатор (рис. 4.28, б) відбувається в кілька етапів. Спершу вмикаються контакти **K1**, з'єднуючи обмотки автотрансформатора в зірку, а потім – контакти **K2**, і двигун виявляється ввімкнутим на напругу вторинної обмотки автотрансформатора, яка в коефіцієнт трансформації K_A автотрансформатора нижча від напруги мережі. Так як струм первинної обмотки автотрансформатора в K_A менший від струму вторинної, то струм в мережі знижується відповідно в K_A^2 раз, у порівнянні з тим, який би мав місце при прямому пуску. Через деякий час, після початкового розгону, контакти **K1** розмикаються і автотрансформатор перетворюється в реактор, напруга на обмотці статора двигуна дещо зростає, але залишається меншою від номінальної. На останньому етапі вмикаються контакти **K3** і двигун попадає під напругу мережі. Отже пуск здійснюється в три етапи: на першому – до двигуна підводиться напруга $U_1 = (0,5 - 0,6)U_{ном}$, на другому – $U_1 = (0,7 - 0,8)U_{ном}$, і нарешті, на третьому – до двигуна підводиться номінальна напруга $U_{ном}$.

Перевага такого способу пуску в тому, що пусковий струм змінюється, як і пусковий момент, пропорційно квадрату відносної зміни напруги $(U_1/U_{ном})^2$, тоді як при реакторному пуску струм – пропорційно відносній зміні – $(U_1/U_{ном})$, а момент – $(U_1/U_{ном})^2$. Не дивлячись на це, такий спосіб використовується тільки в електроприводах досить великої потужності зі складними пусками, що пояснюється більшими затратами через значну ціну автотрансформатора та перемикаючої апаратури.

РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ РОТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

З урахуванням (3.38) та (4.3) частота обертання ротора n_2 асинхронного двигуна

$$n_2 = (60f_1/p) \cdot (1 - s).$$

Із (4. 71) випливає, що регулювання частоти обертання ротора асинхронного двигуна можливе зміною будь-якої з трьох величин: ковзання s , частоти струму в обмотці статора f_1 , або числа пар полюсів двигуна p .

Регулювати частоту обертання зміною ковзання s можна трьома способами: зміною напруги, що підводиться до обмотки статора, порушенням симетрії цієї напруги і зміною активного опору в колі обмотки ротора.

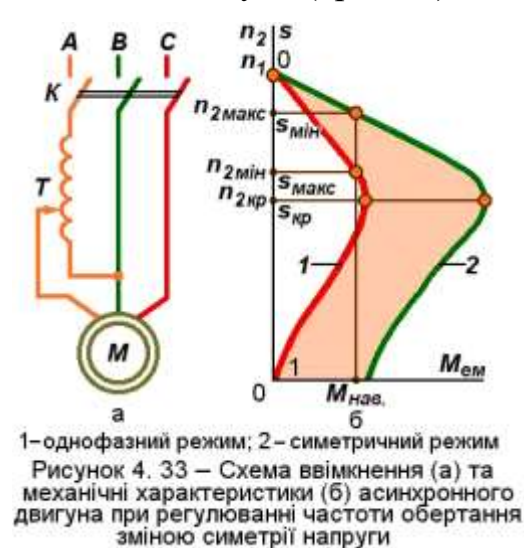
Регулювання частоти обертання зміною ковзання можливе лише під навантаженням. В режимі НХ ковзання, а отже, і частота обертання залишається, практично, незмінними.

Регулювання частоти обертання зміною напруги, що підводиться до обмотки статора. Можливість такого регулювання підтверджується графіками $M_{em} = f(s)$, побудованими для різних значень напруги U_1 (рис. 4.20). При незначному навантаженні на валу двигуна, збільшення підведеної до обмотки статора напруги викликає зростання частоти обертання. Однак, діапазон регулювання частоти обертання досить незначний, що пояснюється вузькою зоною стійкої роботи двигуна, обмеженої значенням критичного ковзання і неможливістю значного підвищення напруги. Останнє пояснюється тим, що з перевищенням номінальної напруги виникає небезпека значного перегрівання двигуна, викликаного різким збільшенням електричних та магнітних втрат. В той же час, зі зменшенням напруги U_1 , двигун втрачає перевантажувальну здатність, яка, як відомо, пропорційна квадрату напруги мережі.

Підведену до двигуна напругу можна регулювати регулювальним автотрансформатором, або реакторами, увімкненими у розрив лінійних проводів.

Вузький діапазон регулювання і неекономічність (необхідність додаткових пристроїв зміни напруги) обмежують галузі застосування цього способу регулювання частоти обертання.

Регулювання частоти обертання порушенням симетрії напруги. При порушенні симетрії напруги, що підводиться до обмотки статора трифазного двигуна, магнітне поле двигуна стає еліптичним. Відомо, що таке поле крім прямого моменту M_{np} , буде створювати і зворотний електромагнітний момент $M_{зв}$. Як наслідок, результатний момент двигуна знижується ($M_{em} = M_{np} - M_{зв}$). Механічні характеристики двигуна при такому способі регулювання розташовуються в зоні, обмеженій характеристикою при живленні симетричною напругою [крива 1 (рис. 4.33, б)] і характеристикою при однофазному живленні двигуна (крива 2) – межа несиметричності трифазної напруги.



Для регулювання несиметричності напруги можна в коло однієї з фаз ввімкнути однофазний регулювальний автотрансформатор T (рис. 4.24, а). При зниженні напруги на виході автотрансформатора несиметричність напруги збільшується, а частота обертання знижується. Недоліком цього способу регулювання є вузька зона регулювання і зниження ККД двигуна при збільшенні несиметричності напруги. Як правило, цей спосіб регулювання частоти обертання застосовують у двигунах малої потужності.

Регулювання частоти обертання зміною активного опору в колі ротора. Такий спосіб регулювання частоти обертання можливий лише у

двигунів з фазним ротором. Механічні характеристики асинхронного двигуна, побудовані для різних значень активного опору кола ротора (рис. 4.25, б), показують, що із збільшенням активного опору кола обмотки ротора зростає ковзання, яке відповідає заданому моменту навантаження. Частота обертання двигуна при цьому знижується. Залежність ковзання (частоти обертання) від активного опору в колі ротора можна виразити, враховуючи (4.46) та (4.49), як

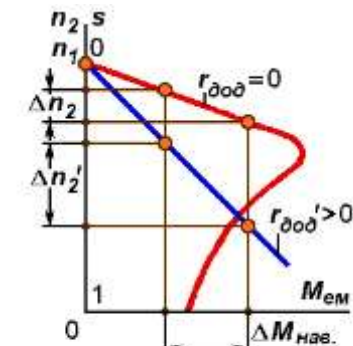


Рисунок 4.34 – Вплив опору в колі обмотки ротора на коливання частоти обертання при зміні навантаження

$$s = m_1 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2' / (M_{em} \cdot \square) \square \square$$

На практиці зміна активного опору в колі обмотки ротора проводиться лише спеціальними регулювальними реостатами, розрахованими на тривалий час роботи (не можна використовувати пускові реостати для регулювання частоти обертання, тому що вони розраховані на короткочасну роботу). Енергія, що витрачається на додаткових регулювальних реостатах досить значна, наприклад, зниження частоти обертання у два рази (збільшення опору так, щоб $s = 0,5$) приводить до втрат, рівних половині потужності двигуна. Це свідчить про суттєву неекономічність такого способу регулювання. Ще одним недоліком цього способу регулювання є те, що реостатна характеристика ($r_{доо}' > 0$) досить м'яка і будь-яка, навіть незначна зміна навантаження, значно змінює частоту обертання ($\Delta n_2' > \Delta n_2$) (рис. 4.34).

Не дивлячись на зазначені недоліки, цей спосіб регулювання широко використовується у двигунах з фазним ротором, так як дозволяє досить просто регулювати частоту обертання від нуля до номінального значення.

Регулювання частоти обертання зміною частоти струмів обмотки статора. Такий спосіб регулювання (*частотне регулювання*) оснований на зміні синхронної частоти обертання $n_1 = 60f_1/p$.

Для здійснення регулювання цим способом необхідно мати джерело живлення двигуна змінним струмом з регулюванню частотою. В якості таких джерел можуть бути електромашинні, іонні та напівпровідникові перетворювачі частоти. Складність такого регулювання полягає в тому, що зміна частоти струму змінює не тільки синхронну частоту обертання поля, але й електромагнітний момент, що розвиває двигун. Тому разом зі зміною частоти струму необхідно змінювати і напругу, щоб підтримувати рівновагу електромагнітного моменту та моменту навантаження на валу. Характер одночасної зміни частоти струмів і напруги залежить від закону зміни моменту навантаження визначається рівнянням

$$U_1'/U_1 = (f_1'/f_1) \cdot \sqrt{M_{em}^1 / M_{em}} \square$$

де U_1 і M_{em} – напруга та електромагнітний момент при частоті f_1 ; U' і M'_{em} – напруга та момент при частоті f_1' .

Якщо частота обертання двигуна регулюється за умови *незмінності моменту навантаження* ($M_{em} = M'_{em} = \text{const}$, рис. 4.36, а), то напругу, що підводиться до двигуна, необхідно змінювати пропорційно зміні частоти струму:

$$U_1' = U_1 \cdot f_1' / f_1$$

При цьому потужність двигуна змінюється пропорційно зміні частоти обертання.

Якщо регулювання проводиться за умови *незмінності потужності двигуна* ($P_{em} = M_{em} \cdot \omega_1 = \text{const}$, рис. 4.36, б), то напругу слід змінювати за квадратичним законом:

$$U_1' = U_1 \sqrt{f_1' / f_1}.$$

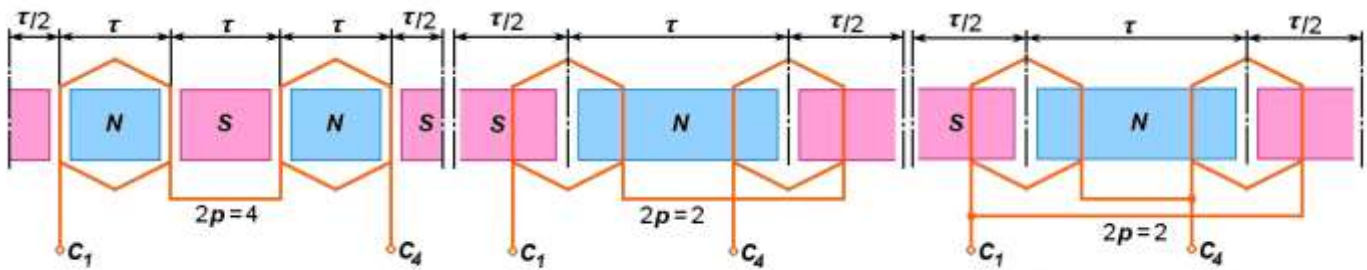


Рисунок 4.35 – Схеми ввімкнення обмотки статора асинхронного двигуна на різне число полюсів

Частотне регулювання двигунів дозволяє плавно змінювати частоту обертання в широкому діапазоні (до 12:1). Однак, джерела живлення, що дозволяють регулювати частоту струму, роблять установку електропривода надто дорогою, тому застосовується таке регулювання лише там, де за умовами пожежної та вибухової безпеки (наприклад, у хімічній та нафтопереробній галузях) неможливо використовувати двигуни постійного струму.

Регулювання частоти обертання зміною числа пар полюсів обмотки статора. При такому регулюванні частоти обертання можлива тільки ступінчаста її зміна і то лише у спеціальних двигунів, на статорі яких є дві обмотки з різним числом пар полюсів, або конструкція обмотки статора, що застосовується найчастіше, дозволяє змінювати число пар полюсів шляхом перемикання секційних груп обмотки (рис. 4.35).

Як і при частотному регулюванні, можливі два режими роботи асинхронних двигунів з обмотками, що перемикають пари полюсів: режим з постійним моментом (рис. 4.36, а) та режим з постійною потужністю (рис. 4.36, б).

В першому випадку при перемиканні двигуна з однієї частоти обертання на іншу обертовий момент на валу двигуна M_2 залишається незмінним, а потужність змінюється пропорційно частоті обертання n_2 :

$$P_2 = 0,1047 M_2 * n_2$$

В режимі постійної потужності при перемиканні двигуна потужність на валу P_2 залишається приблизно однаковою, а момент на валу змінюється відповідно до зміни частоти обертання n_2 :

$$M_2 = 9,55 P_2 / n_2$$

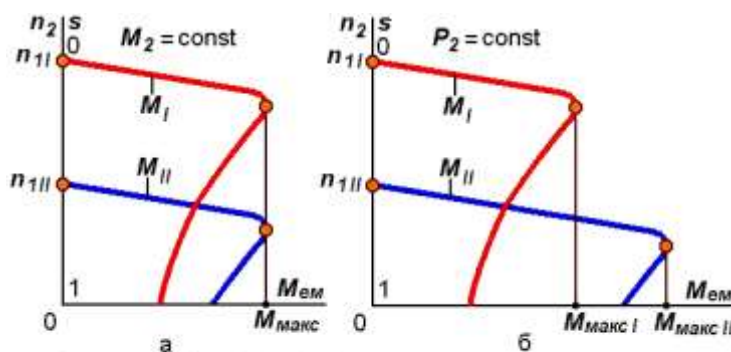


Рисунок 4.36 – Механічні характеристики при перемиканні числа полюсів асинхронного двигуна в режимах постійного моменту (а) та постійної потужності (б)

перемикаючи полюси, то двигун буде чотиришвидкісний.

Регулювання частоти обертання перемиканням числа пар полюсів застосовують лише для двигунів з короткозамкненим ротором, тому що число пар полюсів такого ротора завжди відповідає числу пар полюсів статора. У випадку ж фазного ротора довелося би здійснити перемикання і на роторі, що привело б до значного ускладнення двигуна.

Тема 7. Електронні прилади та пристрої.

1. Електронний вольтметр.
2. Електронно-променевий осцилограф.

1. Електронний вольтметр

Найбільшу групу електронних приладів складають електронні вольтметри, призначені для вимірювання постійної, змінної й імпульсної напруг. За способом відліку розрізняють аналогові (стрілочні) і цифрові прилади такого типу. Основними перевагами електронних вольтметрів є висока чутливість, що регулюється в широких межах, великий вхідний опір і мале споживання електроенергії, широкий діапазон частот та ін.

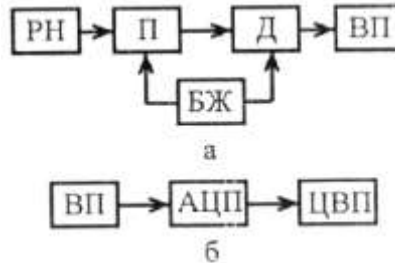


Рис. 1

Приблизні структурні схеми електронних вольтметрів. У приладі аналогового типу основними елементами є розподільник напруги РН, підсилювач П, випрямляч-детектор Д (не обов'язковий), вимірювальний прилад ВП стрілочного типу, блок живлення ВЖ. У цифровому вольтметрі, як правило, присутні три головні функціональні вузли: вхідний пристрій ВП (наприклад, розподільник напруги), аналого-цифровий перетворювач АЦП, цифровий відліковий пристрій ЦВП.

Цифрові вольтметри, порівняно з аналоговими, є складнішими за побудовою, що впливає на їхню надійність і вартість, крім того, вони видають інформацію в дискретній формі. Однак це компенсується вищими точністю і швидкістю, зручнішою формою реєстрації інформації. Цифрові електронні вольтметри дозволяють також автоматизувати процес вимірювання, можуть використовуватися в комплексі з ЕОМ для контролю і керування технологічними процесами, дають можливість, поряд з постійними і періодичними, вимірювати також імпульсні напруги.

Електронні прилади обох типів, укомплектовані вимірювальними шунтами або іншими перетворювачами, стають універсальними приладами, які можна також використовувати для вимірювання струмів і опорів.

Одним із прикладів цього є універсальний цифровий вольтметр В7-35. Зовнішній вигляд приладу. Прилад призначається для вимірювання напруг і струмів у колах постійного і змінного струмів і опору постійному струму з індикацією результатів вимірювання в цифровій формі на табло 2 і з автоматичним вибором границі вимірювань.

Вибір виду вимірювань проводять вручну перемикачами, розташованими на передній панелі вольтметра.

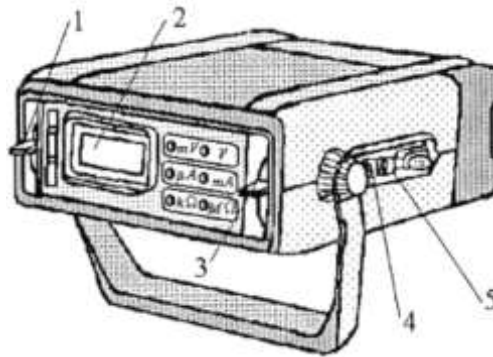


Рис. 2

Перемикач роду роботи 1 має положення: «-» - вимірювання сигналів постійного струму; «~» - вимірювання сигналів змінного струму в діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц; «ВЧ» - вимірювання напруг змінного струму в діапазоні частот від 20 кГц до 100 МГц.

Перемикач роду величин 3 має положення: «mV-V» - вимірювання напруг; «кΩ-кΩ» - вимірювання струмів; «кΩ-МΩ» - вимірювання опорів.

Для проведення вимірювань необхідно: увімкнути живлення вольтметра і дати йому прогрітись; установити перемикачі 1 і 3 у необхідні положення; за допомогою з'єднаних проводів джерело вимірювального сигналу підключити до гнізд «ВХІД» 4 і «*» 5 на боковій стінці приладу, після чого зробити вимірювання за допомогою відліку показів на табло 2.

2. Електронно-променевий осцилограф

Для дослідження і реєстрації процесів, що протікають дуже швидко, застосовують електронно-променеві осцилографи. У таких приладах на люмінесцентному екрані за допомогою вузького променя електронів креслиться крива - функція змінювання в часі досліджуваного сигналу.

Промінь формується електронно-променевою трубкою, що являє собою вакуумну скляну колбу, всередині якої розташовані металічні електроди. Передня частина внутрішньої поверхні колби покрита шаром люмінофора і служить екраном - Е, який світиться в місці потрапляння на нього електронного променя.

У результаті розігріву катода К з його поверхні емітується пучок електронів, який попередньо фокусується сіткою С. Наступне фокусування пучка електронів за віссю трубки здійснюється фокусувальним А1 і прискорювальним А2 анодами. Подальше керування електронним променем здійснюється пластинами, що відхиляють промінь по вертикальній у і розгортають по горизонтальній х осям, відповідно Π_y і Π_x .

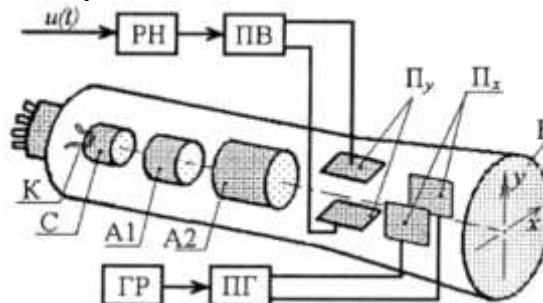


Рис. 3

Канал вертикального відхилення променя складається із вхідного розподільника напруги РН, підсилювача ПВ і вертикально відхиляючих пластин. Канал горизонтального відхилення служить для створення і передачі напруги, яка визначає розгортку

електронного променя за віссю x . До його складу входять: генератор розгортки ГР, підсилювач ПГ і горизонтально відхильні пластини. До цього каналу належать також вузли синхронізації генератора розгортки з дослідною напругою, оскільки для отримання стійкої нерухомої осцилограми частоти дослідної напруги і напруги розгортки повинні бути рівні або кратні (умова синхронізації). Крім вказаних, в осцилографі можуть бути різні допоміжні елементи і кола, що дозволяють керувати яскравістю, фокусуванням і зміщенням по осям координат електронного променя, здійснювати калібрування тривалості й амплітуди сигналу та ін. За відсутності вбудованих калібраторів калібрування може бути здійснене за допомогою вольтметра і джерела сигналів відомої частоти.

Приклад електронно-променевого осцилографа подано - це осцилограф С1-61.

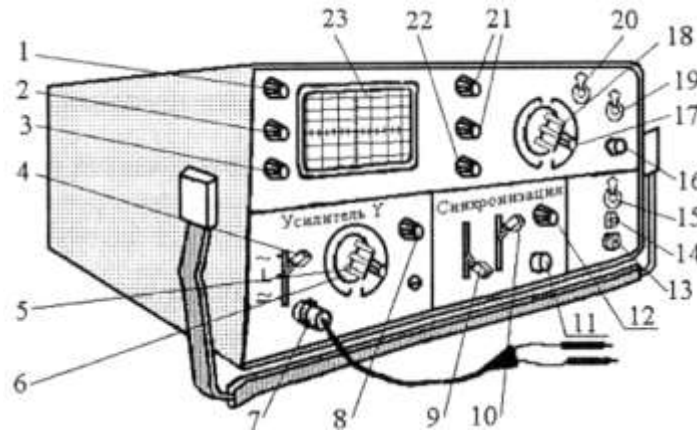


Рис. 4

На передній панелі осцилографа знаходяться: 1 - регулятор яскравості; 2 - регулятор фокусування променя; 3 - регулятор освітлення шкали; 4 - вибір режиму відкритого, закритого і заземленого входу підсилювача; 5 - перемикач входного атенюатора (дискретне регулювання чутливості підсилювача – вольт/поділка); 6 - плавне регулювання чутливості підсилювача; 7 - гніздо для подачі досліджуваного сигналу; 8 - регулятор переміщення променя по вертикалі; 9 - перемикач виду синхронізації (внутрішня-зовнішня); 10 - перемикач полярності синхронізації; 11 - вхідне гніздо підсилювача горизонтального відхилення; 12 - вибір рівня запуску розгортки; 13 - клемма для підключення корпусу приладу; 14 - гніздо виводу калібрувальної напруги - 0,6V; 15 - вибір виду калібрувальної напруги; 16 - гніздо для виводу пилоподібної напруги; 17 - плавне регулювання тривалості розгортки; 18 - перемикач тривалості розгортки (час/поділка); 19 - тумблер множника розгортки « $\times 1$, $\times 0,2$ »; 20 - тумблер вмикання і вимикання приладу «мережа»; 21 - регулятори переміщення променя по горизонталі (грубо, плавно); 22 - вибір режиму роботи генератора розгортки; 23 - екран.

Перед вмиканням приладу органи керування треба встановити у визначені положення; підключити осцилограф з'єднувальним шнуром до мережі 220 В і тумблером «мережа» увімкнути його. Через 2-3 хвилини після вмикання відрегулювати яскравість і фокусування променя. Якщо при максимальній яскравості променя не буде на екрані - ручками «8» і «21» перемістити його в межі робочої частини екрану.

За допомогою спеціального кабелю подати сигнал на вхідне гніздо 7 і регуляторами 5 і 6 досягнути необхідного масштабу зображення сигналу. Регуляторами 17 і 18 встановити тривалість розгортки такою, щоб можна було зручно спостерігати форму досліджуваного сигналу.

Тема 8. Електропровід, апаратура керування та захисту

1. Класифікація електричних апаратів. Апарати ручного керування
2. Автоматичні вимикачі. Пристрої захисту електроустановок та електромереж від аномальних режимів.

1. Класифікація електричних апаратів. Апарати ручного керування.

Виходячи із принципу дії ТАД, виведемо математичний вираз його електромагнітного моменту. І оскільки все за виникає за сприяння магнітного поля, то з нього і почнемо.

Розглянемо в обмотці ротора контури, створені діаметрально розташованими її провідниками. Тоді з контуром, площа якого перпендикулярна силовим лініям магнітного поля, зчеплений максимальний потік Φ_r , а для контура, площа якого паралельна силовим лініям, потік $\Phi=0$. Відносно поля ротор переміщується з частотою обертання n_5 , тому у всіх контурах магнітний потік змінюється від $-\Phi_r$ до $+\Phi_r$ з частотою f_2 .

Магнітне поле має одну пару полюсів: під полюсом N силові лінії входять у ротор (це будемо вважати їхнім позитивним напрямком), під полюсом S виходять (негативний напрямком).

У загальному випадку за наявності p пар полюсів величина

$$\tau = \frac{\pi D_p}{2p}$$

називається полюсним поділом - це довжина дуги окружності на діаметрі поверхні ротора B_p , що припадає на один полюс.

Тоді середнє значення магнітної індукції на поверхні ротора, виходячи з формули,

$$B_{\text{ср}} = \frac{\Phi_m}{(\tau \cdot l_p)}$$

а конкретний розподіл магнітної індукції на поверхні ротора показано векторами B_r . Щоб показати це графічно, розгорнемо кругову лінію поверхні ротора в пряму лінію, її початок візьмемо в точці 0, а напрямок задамо координатою x проти руху стрілок годинника.

Розподіл магнітної індукції $B(x)$ уздовж лінії x на її довжині 2τ зображено. Ця функція в ТАД вважається синусоїдною і її в даному випадку можна записати так

$$B_1 = B_m \sin \frac{\pi}{\tau} x$$

де, з урахуванням відомого для синусоїд співвідношення

$$B_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} B_m,$$

і з урахуванням, амплітуда магнітної індукції

$$B_m = \frac{\pi \cdot \Phi_m}{2\tau \cdot l_p}$$

Нехай система координат разом із кривою $B(x)$ рухається зі швидкістю U_b , що відповідає частоті обертання n_x .

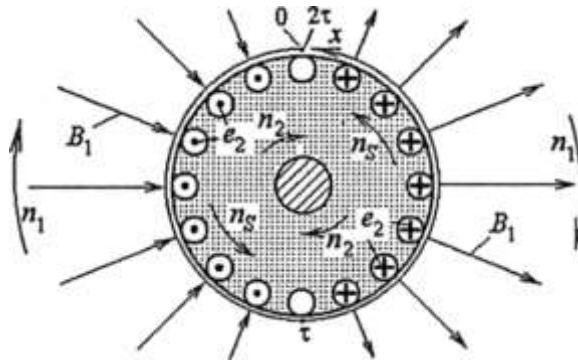


Рис. 6

Туди ж зі швидкістю U_2 , що відповідає частоті обертання ротора p_2 , рухаються провідники його обмотки. Тоді відносно осі x ці провідники переміщуються з відносною швидкістю U_5 , що відповідає частоті ковзання S . З урахуванням ця швидкість.

$$V_s = \frac{n_s}{60} \pi D_p = \frac{n_s s}{60} \pi D_p = \frac{60 f_1 s}{p \cdot 60} \pi D_p = f_2 \frac{\pi D_p}{p} = 2\tau f_2$$

Будемо вважати, зображено миттєве положення провідників для моменту часу $t=0$. Тоді з плином часу провідники змінюють своє розташування відносно осі x . І для провідника k з початковим положенням

$$x_{k,0} = \frac{2\tau p k}{N_p}$$

де N_p – кількість провідників обмотки ротора, отримується поточна координата

$$x_k = V_s t + x_{k,0} = 2\tau f_2 t + \frac{2\tau p}{N_p} k.$$

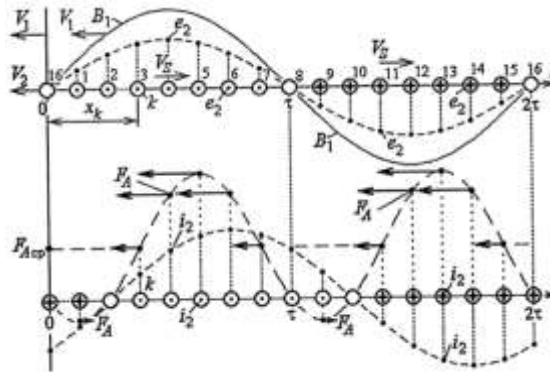


Рис. 7

З урахуванням переміщення провідників відносно хвиль кривої $B_1(x)$, можна записати миттєві значення магнітної індукції для провідника з номером k як функцію часу, підставивши, а саме:

$$B_{1,k} = B_m \sin \frac{\pi}{\tau} \left(2\tau f_2 t + \frac{2\tau p}{N_p} k \right) = B_m \sin \left(2\pi f_2 t + \frac{2p\pi}{N_p} k \right) = B_m \sin (\omega_2 t + \psi_{k,0}),$$

де $\omega_2 = 2\pi f_2$ - кутова частота;

За в /с-тому провіднику ротора миттєве значення ЕРС

$$e_{2,k} = V_s l_p B_{1,k} = 2\tau f_2 l_p B_m \sin (\omega_2 t + \psi_{k,0}) = E_{2m} \sin (\omega_2 t + \psi_{k,0})$$

є синусоїдною функцією часу з частотою f_2 і амплітудою $S_{2m} = 2T/2Z_p B_m$.

Відповідний розподіл миттєвих значень ЕРС e_2 по всіх провідниках показано точками. Обвідна крива $e_2(x)$ просторово подібна до кривої $B^{\wedge}(x)$ і вони рухаються синхронно.

В інших провідниках обмотки ротора все буде аналогічно, але з певним часовим зсувом. І під дією ЕРС e_2 в кожному провіднику короткозамкненого ротора виникає синусоїдний струм

$$i_{2,k} = I_{2m} \sin(\omega_2 t + \psi_{k,0} - \psi_2)$$

де амплітуда струму і його фазовий зсув відносно ЕРС e_2 визначаються з використанням активного R_2 й індуктивного X_2 опорів фази обмотки ротора за звичайними правилами розрахунку кіл синусоїдного струму:

$$I_{2m} = \frac{E_{2m}}{Z_2} = \frac{E_{2m}}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}; \quad \psi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2}$$

Для ілюстрації припустимо. Такому фазовому зсуву буде відповідати просторовий зсув (відставання) струму i_2 від ЕРС e_2 на $\pi/4$. Відповідний розподіл миттєвих значень струмів i_2 по провідниках показано в нижній частині.

Підставимо у формулу й отримаємо силу, що діє на k -тий провідник ротора

$$F_{A,k} = B_m \sin(\omega_2 t + \psi_{k,0}) \cdot I_{2m} \sin(\omega_2 t + \psi_{k,0} - \psi_2) \cdot l_p = \\ = \frac{B_m I_{2m} l_p}{2} [\cos \psi_2 - \cos(2\omega_2 t + 2\psi_{k,0} - \psi_2)]$$

Миттєвий розподіл сил по провідниках при $t=0$ показано у взаємозв'язку з розподілами B_v e_2 і i_2 .

За період $T_2 = 2\pi/\omega_2$ зміни цих величин середнє значення сили для k -того провідника

$$F_{A,k,ср} = \frac{1}{T_2} \int_0^{T_2} F_{A,k} dt = \\ = \frac{1}{T_2} \frac{B_m I_{2m} l_p}{2} \int_0^{T_2} [\cos \psi_2 - \cos(2\omega_2 t + 2\psi_{k,0} - \psi_2)] dt = \frac{B_m I_{2m} l_p}{2} \cos \psi_2$$

Це середнє значення сили за період дає середнє значення моменту обертання для одного провідника

$$m_{зр,ср} = \frac{F_{A,k,ср} D_p}{2}$$

А з урахуванням усіх провідників отримуємо обертальний електромагнітний момент, що діє на ротор,

$$M_{EM} = N_p F_{A,k,ср} \frac{D_p}{2} = \frac{N_p B_m I_{2m} l_p D_p}{4} \cos \psi_2$$

Якщо підставити B_m за і виразити амплітуду струму через його діюче значення I_2 , то з урахуванням

$$M_{EM} = \frac{\pi \Phi_m}{2\tau l_p} \sqrt{2} I_2 \frac{l_p N_p D_p}{4} \cos \psi_2 = \frac{p}{2\sqrt{2}} N_p \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

Параметри ТАД в виразимо коефіцієнтом

$$C_{EM} = \frac{p}{2\sqrt{2}} N_p$$

і подамо електромагнітний момент у формі

$$M_{EM} = C_{EM} \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

Тут у явному вигляді залишились величини Φ_m , I_2 , ψ_2 , які можуть змінюватися в процесі роботи ТАД. Ця формула нагадує формулу електромагнітного моменту МПС, але з суттєвим додатком $\cos \psi_2$, породженого специфікою машини змінного струму.

Формула явно показує, що електромагнітний момент ТАД породжений взаємодією магнітного поля, збудженого обмоткою статора, і струму ротора. Але, на відміну від МПС, струм у ротор не треба підводити через щітки і колектор - він індукується обертовим магнітним полем. Це і стало суттєвою перевагою ТАД над ДПС

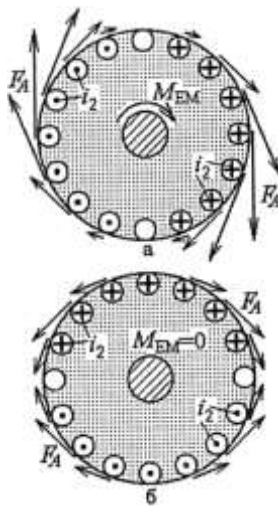


Рис. 8

Вплив фазового зсуву на M_{EM} показано на рис. розподілом сил F_{Ak} по провідниках ротора для двох крайніх випадків. При $R_2 > X_2$ за $\psi_2 > 0$ і всі сили F_A за діють погоджено, створюючи найбільше значення M_{EM} . При $R_2 < X_2$ отримується $\psi_2 \rightarrow \pi/2$ і за створюється баланс позитивних і негативних значень сил E_A , а сумарний $M_{EM} = 0$.

Формула M_{EM} й інші формули отримані в припущенні короткозамкненої обмотки ротора. Проте вираз справедливий і для обмотки фазного ротора, тільки за будуть отримані ЕРС і струм однієї фазної обмотки з урахуванням всіх ω_2 її витків, а в треба використовувати опори не одного провідника, а знову ж таки, всієї фазної обмотки.

Так, наприклад, для фазного ротора амплітуда ЕРС

$$E_{2m} = 2\tau f_2 l_p B_m \cdot 2\omega_2 k_{OB2}$$

отримується помноженням амплітуди ЕРС одного провідника із на кількість провідників фазної обмотки $N_\phi = 2\omega_2$ і на k_{OB2} - обмотковий коефіцієнт. Останнім урахується, що ЕРС окремих провідників зсунуті одна відносно одної за фазою і сума таких ЕРС менше їхньої арифметичної суми ($k_{OB2} < 1$).

Із отримується і діюче значення ЕРС фазної обмотки

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4,44 f_2 \omega_2 \Phi_m k_{OB2},$$

де спрощення досягнуті підстановкою величин τ за і B_τ .

2. Автоматичні вимикачі. Пристрої захисту електроустановок та електромереж від аномальних режимів.

Процес передачі електричної енергії в ТАД ілюструється діаграмою потужностей.

Із живильної мережі на трифазну обмотку статора поступає електрична енергія з активною потужністю

де $U_1 I_{11}$ - діючі значення фазних напруги і струму; ϕ_1 - фазовий зсув між ними; $\cos \phi_1$ називають коефіцієнтом потужності ТАД.

При з'єднанні обмотки статора за схемою «зірка»:

$$U_1 = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}; I_1 = I_\Delta,$$

за схемою «трикутник»:

$$U_1 = U_\Delta; I_1 = \frac{I_\Delta}{\sqrt{3}}$$

Тому потужність P_1 можна в обох випадках виразити однаково через лінійні напругу U_Δ і струм I_Δ :

$$P_1 = \sqrt{3} U_\Delta I_\Delta \cos \phi_1$$

Механічна потужність, що віддається з вала ТАД якому-небудь механізмові, вважається корисною потужністю

$$P_2 = \frac{Mn}{9,55}$$

де M - обертальний момент на валу; $n=n_2$ - частота обертання ротора (індекс «2» опускають, розглядаючи частоту обертання n як вихідну величину ТАД). Співвідношення одиниць вимірювання в відповідає.

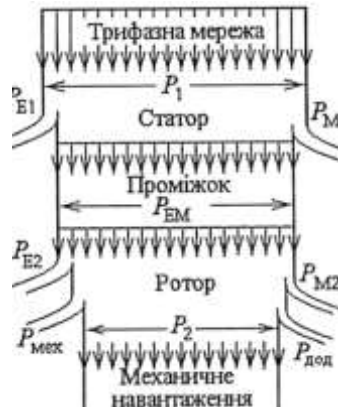


Рис. 9

Різниця витраченої і корисної потужностей - втрати потужності

$$\Delta P = P_1 - P_2,$$

які підсумовуються зі складових, в основному подібних до втрат потужності в МПС.

У ТАД існують такі складові втрат потужності: електричні втрати потужності в обмотці статора

$$P_{E1} = 3R_1 I_1^2;$$

магнітні втрати в осерді статора, що спричиняються магнітним потоком, який змінюється з частотою f_1 , і мають відому природу, тобто

$$P_{M1} = P_{BX} + P_{ГС};$$

електричні втрати в обмотці ротора

$$P_{E2} = m_2 R_2 I_2^2;$$

магнітні втрати P_{M2} є і в осерді ротора, але вони відносно малі - тут магнітне поле змінюється з меншою частотою f_2 ; механічні втрати $P_{мех}$ складаються із втрат від тертя в підшипниках і об повітря, тертя щіток об контактні кільця (якщо вони є), вентиляційних втрат;

додаткові втрати $P_{доп}$, що виникають у зубцях статора і ротора, через зубцеві пульсації магнітного поля.

На діаграмі є також електромагнітна потужність P_{EM} , що передається зі статора на ротор за допомогою обертового магнітного поля. Ця потужність пов'язана з електромагнітним моментом формулою, структура якої відповідає, а саме:

$$P_{EM} = \frac{M_{EM} n_1}{9,55}.$$

У ТАД, як і в інших пристроях, ККД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

змінюється зі зміною його навантаження. Номінальне значення ККД $\eta_{ном}$ може складати 0,65...0,9, де більші значення забезпечуються в більш потужних і великих ТАД.

Тема 9. Виробництво розподіл електричної енергії

Енергетичні системи. Електростанції. Підстанції

Системи Електроенергії, компоненти, які перетворюють інші типи енергії в електричну енергію і передають цю енергію споживачу. Виробництво та передача електрики щодо ефективні і недорогі, хоча на відміну від інших видів енергії, електрика не просто зберігати і таким чином має відразу використовуватися, оскільки воно виробляється.

Компоненти Енергетичної Системи

Сучасна система електроенергії складається з шести головних компонентів: 1) електростанція, 2) ряд трансформаторів, щоб підняти отриману потужність до високої напруги використовуючи на лініях передачі, 3) лінії передачі, 4) підстанції, в яких енергія знижується до напруги на лініях розподілу, 5) лінії розподілу, і 6) трансформатори, які знижують напругу розподілу до рівня, використовуваному обладнанням споживача.

Електростанція

Система потужності електростанції складається з первинного двигуна, такого як турбіна, яку обертають за допомогою води, пари, або газів згоряння, які керують системою електромоторів і генераторів. Велика частина електроенергії у світі виробляється на парових заводах, які використовують вугілля, нафту, ядерну енергію, або газ. Менший відсоток від електроенергії у світі зроблений гідроелектричним (гідроенергія), дизель, і двигунами внутрішнього згоряння (див. Світове Енергопостачання).

Трансформатори

Сучасні системи електроенергії використовують трансформатори, щоб перетворити електрику в різні напруги. З трансформаторами кожного ступеня системи можна керувати відповідно напрузі. У типовій системі генератори в електростанції поставляють напругу від 1 000 до 26 000 В (V). Трансформатори підвищують цю напругу до значень в межах від 138 000 - 765 000 V для далекої первинної лінії передачі, тому що вищі напруги передаються більш ефективно на довгі відстані. У підстанції напруга може бути знижений до рівнів 69 000 - 138 000 V для подальшої передачі за системою розподілу. Інша частина трансформаторів знижує напругу знову до рівня розподілу такого як 2400 або 4160 V або 15, 27, або 33 kilovolts (кВ). Нарешті напруга перетворено ще раз на трансформаторі розподілу близько значень які використовують 240 або 120 V.

Лінії передачі

Системи ліній передачі високої напруги зазвичай роблять з проводів міді, алюмінію, або мідно-ізолюваною або алюмінієво-ізолюваною стали, які відокремлені від сталевих конструкцій високих опор поруч фарфорових ізоляторів. За допомогою одягнених сталевих дротів і високих опор, відстань між опорами може бути збільшено, і вартість лінії передачі, таким чином зменшено. У сучасних установках з надзвичайно прямими

напряжками лінії високої напруги можуть бути побудовані тільки з шістьма опорами на кілометр. У деяких місцях лінії високої напруги відокремлені від високих дерев'яних опор, розташованих більш близько.

Для ліній розподілу більш низьких напруги дерев'яні опори частіше використовуються, а не сталеві опори. У містах та інших областях, де відкриті лінії створюють небезпеку або вважаються недоречними, ізольовані підземні кабелі, використовуються для розподілу. У деяких з цих кабелів є порожнеча всередині, через яку масло циркулює під низьким тиском. Масло забезпечує, тимчасовий захист від водного пошкодження вкладених проводів кабель закритий від витоків. Кабелі типу труби, в яких три кабелі прикладені в трубі, заповненою маслом під високим тиском (14 кг в кв. См/200 psi) часто використовуються. Ці кабелі використовуються для передачі струму напругою таким як 345 000 V (або 345 кВ).

Додаткове Устаткування

Будь-яка електрична система розподілу включає велику кількість додаткового обладнання, щоб захистити генератори, трансформатори, і лінії передачі безпосередньо. Система часто включає пристрої, розроблені, щоб відрегулювати напругу або інші особливості потужності, переданої споживачам.

Щоб захистити всі елементи системи потужності від коротких замикань і перевантажень, і для нормальних операцій перемикання, використовуються роз'єдинителі. Ці роз'єдинителі - великі вимикачі, які активізуються автоматично в разі короткого замикання або іншого випадку, яке викликає раптове підвищення струму. Оскільки струм проходить через контакти вимикача миттєво, коли струм переривається, деякі великі роз'єдинителі (такі як використовують у захисті генератора або секції первинної лінії передачі) занурені в рідину, яка є слабким провідником електрики, такого як масло, пригнічує струм (див. діелектрик). У великих вимикачах повітряного типу, так само як в масляних вимикачах, використовуються магнітні поля, щоб роз'єдинити струм. Маленькі повітряні вимикачі використовуються для захисту в магазинах, фабриках, і в сучасних домашніх пристроях. У місцевому електричному постачанні плавкі запобіжники іноді зазвичай використовують для тієї ж самої мети. Плавкий запобіжник складається з елементів сплаву з низькою температурою плавлення, встроеної в ланцюг, який плавиться, перериваючи ланцюг, якщо струм підвищується вище певного значення. Більшість житлових будинків тепер використовують повітряні вимикачі.

Перебої електроенергії

У більшості частин світу місцеві або національні електричні мережі соединяються в системи мереж. Пов'язані мережі дозволяють електрики, зробленому в одному місці бути розподіленим в інше. Вся потужність, з якої можна отримати користь збільшення пропускної здатності, це використання великих, більш ефективних генераторів, здатних заповнити місцеві відмови електроенергії, отримуючи енергію з соединения мережі.

Ці пов'язані мережі - великі, складні системи, які містять елементи, якими управляють різні групи. Ці системи дають можливість економічних заощаджень і

покращують в цілому надійність, але можуть створити ризик широко поширеного відмови. Наприклад, найбільша поломка системи мережі сталася 9 листопада 1965, в східній Північній Америці, коли пристрій автоматичного управління, яке регулює і направляє протікає струм, підведений в Queenston, Онтаріо, оставело вимикач розімкненим. Хвиля зайвого струму була передана через північно-східні Сполучені Штати. Вимикачі безпеки генератора з Рочестера, Нью-Йорка, до Бостону, Массачусетс, були автоматично відключені, отсоединяя генератори з системи, щоб захистити їх від пошкодження. Мощність, вироблена більш південними заводами, помчала, щоб заповнити прогалину і перевантажила ці заводи, які автоматично відключають себе. Відмова енергії огортов область більше ніж 200 000 кв. км (80000 кв. ми), включаючи міста Бостона; Буффало, Нью-Йорк; Рочестер, Нью-Йорк; та Нью-Йорк.

Подібні відмови мережі, зазвичай в меншому масштабі, турбували системи в Північній Америці і в іншому місці. 13 липня 1977, приблизно 9 мільйонів чоловік в області Нью-Йорка були ще раз обезточени, коли головні лінії передачі зазнали аварію. У деяких областях відключення електрики протривало 25 годин до відновлення, висока напруга спалило обладнання. Ці головні аварії називають падінням напруги.

Найгірше падіння напруги в історії Сполучених Штатів і Канади сталося 14 серпня 2003, коли 61 800 мегават електроенергії були втрачені в області, покриває 50 мільйонів чоловік. (Один мегават електрики - приблизну кількість, яке має жити 750 житлових будинків). Падіння напруги зачіпало такі головні міста як Клівленд, Детройт, Нью-Йорк, Оттава, і Торонто. 1/8 штату Коннектикуту, Массачусетса, Мічигану, Нью-Джерсі, Нью-Йорка, Огайо, Пенсільванії, і Вермонта - і канадські провінції Онтаріо і Québec були так само порушені. Падіння напруги викликало потребу замінити старіюче обладнання і викликало питання про надійність національної мережі.

Термін часткове зниження напруги часто використовується для часткових перебоїв енергії, зазвичай думають, чи зберігати електрику або як військова міра про безпеку. З листопада 2000 до травня 2001 Каліфорнія пережила низку запланованих часткових падінь напруги до груп споживачів, невеликої тривалості, щоб зменшити повне завантаження системи і уникнути затемнення через передбачувані електричних нестач. Однак, дослідження Каліфорнійської Комісією Підприємств комунального обслуговування в передбачуваних брак пізніше показало, що п'ять енергетичних компаній відмовляти в електриці, яке вони, можливо, справили. У 2002 комісія уклала, що відмова електрики посприяв "недобросовісному, несправедливому, і нерозсудливо ціновому стрибку електрики." В результаті Каліфорнійські державні служби заплатили на 20 мільярдів \$ більше за енергію у 2000 ніж у 1999 глава подсчетних комісії.

Комісія також процитувала роль Корпорації Enron у Каліфорнійських часткових зниженнях напруги. У червні 2003 Федеральна енергетична комісія (FERC) заборонила Enron продавати електрику і природний газ в Сполучених Штатах після проведення дослідження у звинуваченнях, що Enron керував цінами на електрику під час енергетичної кризи Каліфорнії. У тому ж самому місяці Федеральний бюро розслідувань заарештував керівника Enron за звинуваченням в управлінні ціною електрики в

Каліфорнії. Два інших службовців Enron, відомих як торговці, тому що вони продали електрика, визнали себе винним в подібних звинуваченнях. Див також Скандал Enron.

Незважаючи на потенціал рідкісних широко поширених проблем, пов'язана система мережі забезпечує необхідні резервні та додаткові шляхи для потоку енергії, що приводить до набагато більш високою в цілому надійності, ніж можливо з окремими системами. Національні або регіональні мережі можуть також справитися з несподіваними відключеннями електрики, такими як викликані штормами, землетрусами, зсувами, і лісовими пожежами, або через людську помилку або навмисних актів саботажу.

Якість енергії

В останні роки електрику використовувалося, щоб зробити складніші і технічно складні виробничі процеси в дію, комп'ютери і комп'ютерні мережі, і безліч інших високотехнологічних товарів народного споживання. Ці продукти і процеси чутливі не тільки до безперервності електроживлення але також і до сталості електричної частоти і напруги. Отже, підприємства комунального обслуговування приймають нові заходи, щоб забезпечити необхідну надійність і якість електроенергії, такий як, забезпечуючи додаткове електричне обладнання, щоб запевнити, що напруга та інші особливості електроенергії є постійними.

Регулювання Напруги

У довгих ліній передачі є значна індуктивність і ємність. Коли струм тече через лінію, індуктивність і ємність мають ефект зміни напруги на лінії, оскільки потік змінюється. Таким чином напругу постачання міняється залежно від навантаження. Кілька видів пристроїв використовуються, щоб подолати це небажана зміна в експлуатації, названої регулюванням напруги. Пристрої включають регулятори індукції і синхронні двигуни з трьома фазами (названий синхронними конденсаторами), обидва з яких змінюють ефективну кількість індуктивності і ємності в ланцюзі передачі струму.

Індуктивність і ємність реагують з тенденцією анулювати один одного. Коли ланцюг навантаження має більш індуктивний ніж ємнісний характер, що майже незмінно відбувається у великих системах потужності, кількість потужності, поставленої для даної напруги і потоку, менше ніж тоді, коли ці два рівні. Ставлення цих двох кількості потужності називають коефіцієнтом потужності. Оскільки втрати лінії передачі пропорційні потоку, ємність підключена до ланцюга не завжди, таким чином забезпечуючи коефіцієнт потужності майже в 1. Тому великі конденсатори часто вставляються як частина систем передачі енергії.

Світове Виробництво Електроенергії

За період з 1950 до 2006, новий рік, протягом якого дані - доступне, щорічне світове виробництво електроенергії та споживання, підвищилися більш ніж від 1 трильйона годин кіловата (kwh) до 18 трильйонів kwh. Зміна також мало місце в типі Отримані електроенергії. У 1950 2/3 електрики в світі було отримано з парогенераторів і приблизно однієї третини з гідроелектричних джерел. У 2006 теплові джерела справили 66 відсотків потужності, але гідроелектроенергія зменшилася до 17 відсоткам, і ядерна енергія становила 15

відсотків загальної кількості. Зростання в ядерній енергії сповільнилося в деяких країнах, особливо Сполучені Штати, у відповідь на проблеми про безпеку. Ядерні установки виробили 19 відсотків американського електрики в 2006; у Франції, світовому лідері, число становило 79 відсотків. Див Ядерну енергію.

Зберігання

Велика частина електрики у світі вироблена з використання невідновлюваних ресурсів, таких як природний газ, вугілля, нафта, і уран. Вугілля, нафта, і природний газ містять вуглець, і спалюючи це викопне паливо сприяє глобальній емісії вуглекислого газу та інших забруднювачів. Вчені вважають, що вуглекислий газ - основний газ, відповідальний за глобальне потепління, стійке підвищення поверхневої температури Землі.

Споживачі електрики можуть заощаджувати гроші, і допомогти захистити довкілля, усуваючи непотрібне використання електрики, такого як виключення світла, залишаючи кімнату. Інші методи збереження включають закупівлю і використання приладів з низьким енергоспоживанням і лампочок, і використання приладів, таких як пральні машини і сушарки, в непікові годинник виробництва, коли тариф нижче. Споживачі можуть також розглянути екологічні заходи, такі як покупка "зеленої електроенергії", коли це дає користь природі. "Зелена електроенергія" зазвичай більш дорога, але покладається на поновлювані та нешкідливі для навколишнього середовища джерела енергії, такі як вітрові турбіни і геотермічні електростанції.

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання самостійної роботи
для студентів 2 та 1 с.т. курсів спеціальності
208 "Агроінженерія"
ОС «Бакалавр»
денної та заочної форм навчання
Частина 1

Сумський НАУ, вул.. Г. Кондратьєва 160

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

