

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
Частина 1 – Трансформатори. Машини постійного струму.
Основи електроприводу.

Методичні вказівки
щодо виконання самостійної роботи

СУМИ – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

частина 1

Методичні вказівки
до виконання самостійної роботи

для здобувачів освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 2с.т , 3 курсу денної та 1 с.т., 2с.т., 4 курсу заочної форми здобуття освіти ступеня вищої освіти «бакалавр»

СУМИ – 2025

УДК 631.371

Укладачі: **Чепіжний А.В.**, к.т.н., доцент, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

Юрченко О.Ю., ст. викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем

Рясна О.В., ст. викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем

Тесленко О.В., асистент кафедри енергетики та електротехнічних систем

Н 18 Науково-методичне забезпечення навчального процесу

методичні вказівки до виконання самостійної роботи./ укл.:

Чепіжний А.В., Юрченко О.Ю., Рясна О.В., Тесленко О.В. -

Суми, 2025. – 91 с.

У методичних вказівках до виконання самостійної роботи наведені: матеріал написаний у формі лекцій, прийнятий такий порядок подачі матеріалу: машини змінного струму.

Поряд з електричними машинами змінного струму розглянуті деякі види цих пристроїв спеціального призначення. Зроблено аспект на роботу електроприводу: вивчення, будови та принципу дії, механіки, моделі структури, характеристики та регульовальні властивості з ДПС. Для самоконтролю знань є завдання (тести).

Рецензенти:

Козін В.М., к.т.н., доцент кафедри «Енергетика та електротехнічні системи» СНАУ;

Лобода В.Б., к.ф.-м.н., професор кафедри охорони праці та фізики СНАУ.

Відповідальний за випуск:

Чепіжний А.В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ.

Рекомендовано до видання Радою якості інженерно-технологічного факультету.
Протокол №4 від «28» січня 2025 року

ЗМІСТ

		<i>Стор.</i>
1	Тема №1 Спрошені схема заміщення та векторно-потенціальні діаграми трансформатора	9
2	Тема №2 Явища, що мають місце при намагнічуванні трансформатора	12
3	Тема №3 Розподіл навантаження між працюючими паралельно трансформаторами	15
4	Тема №4 Регулювання напруги та перехідні процеси в трансформаторах	17
5	Тема №5 Триобмоткові трансформатори та автотрансформатори	19
6	Тема № 6 Трансформаторні пристрої спеціального призначення	23
7	Тема № 7 Обмотки якоря машин постійного струму	29
8	Тема № 8 Магнітне поле машини постійного струму	34
9	Тема № 9 Комутація в машинах постійного струму	40
10	Тема № 10 Рівняння генераторів постійного струму	48
11	Тема № 11 Режими роботи машини постійного струму	52
12	Тема № 12 Двигуни постійного струму послідовного збудження	58
13	Тема 13 Вступ. Загальні відомості.	62
14	Тема 14. Тема електропривод дпс. Механічні властивості та режими роботи дпс з незалежним (паралельним) та послідовним збудженням.	68
15	Тема 15. Регулювання частоти обертання ДПС НЗ.	77
16	ПРОМІЖНИЙ КОНТРОЛЬ ЗНАНЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТОМ РОБОТИ ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОГО ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ	84
17	ПЕРЕЛІК ТЕМ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ.....	85
18	ЗАВДАННЯ (ТЕСТИ) ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ЗНАНЬ.	
	ДОДАТОК А.....	86
19	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89

Тематичний план

№ з/п	Тема самостійного заняття	Кількість годин	
		Денна форма	Заочна форма
1	Спрощені схема заміщення та векторно-потенціальні діаграми трансформатора	17	21
2	Явища, що мають місце при намагнічуванні трансформатора	17	21
3	Розподіл навантаження між працюючими паралельно трансформаторами	16	20
4	Регулювання напруги та перехідні процеси в трансформаторах	16	20
5	Триобмоткові трансформатори та автотрансформатори	16	20
6	Трансформаторні пристрої спеціального призначення	16	20
7	Обмотки якоря машин постійного струму	16	20
8	Магнітне поле машини постійного струму	16	20
9	Комутація в машинах постійного струму	16	20
10	Рівняння генераторів постійного струму	16	20
11	Режими роботи машини постійного струму	16	20
12	Двигуни постійного струму послідовного збудження	16	20
	Разом годин:	194	242

ВСТУП

У методичних вказівках до виконання самостійної роботи наведені: матеріал написаний у формі лекцій, прийнятий такий порядок подачі матеріалу: машини змінного струму, механіки та енергетики електроприводу.

Поряд з електричними машинами змінного струму розглянуті деякі види цих пристроїв спеціального призначення. Електропривід — це електромеханічна система для надання руху із заданими параметрами виконавчим механізмам робочих машин.

Сучасний електропривід — це сукупність електродвигуна, який є джерелом механічної енергії, апаратури керування і захисту, а також механічної, гідравлічної або електричної передачі. Електроприводи є основними споживачами електричної енергії і головним джерелом механічної енергії в промисловості.

Найефективнішим способом економії енергії на всіх виробництвах, де потрібне регулювання продуктивності механізмів на базі електродвигунів змінного струму є застосування регульованого електропривода змінного струму.

Впровадження такого електропривода на механізмах з квадратичним навантаженням (насосів, вентиляторів, повітродувок) дозволяє відмовитися від дроселювання і досягти економії електроенергії в 30-70 %.

При підготовці вказівок основний ухил зроблено на розкриття фізичної суті явищ, що визначають роботу електричних машин при номінальних режимах, а також у робочих, механічних режимах роботи. Матеріал повністю відповідає сучасному підходу до теорії та практики електроенергетики.

Виклад кожної лекції закінчується переліком того, що слід запам'ятати, а також подається низка запитань теоретичного та практичного плану, що допоможе краще засвоювати матеріал лекції при самостійному її опрацюванні.

Дані методичні рекомендації призначені для допомоги в організації самотійної роботи здобувачами вищої освіти під час вивчення дисципліни «**Електричні машини**», а також допомогти їм у практичній реалізації набутих знань.

Мета самостійної роботи здобувача вищої освіти полягає в науково обґрунтованій системі дидактично та методично оформленого навчального матеріалу, що визначається з урахуванням структурно-логічної схеми підготовки фахівців, яку відображено в освітньо-професійній програмі та робочому навчальному плані. Зміст самостійної роботи студента з кожної навчальної дисципліни визначається робочою програмою навчальної дисципліни, методичними матеріалами, завданнями та вказівками викладача.

Робочою програмою дисципліни «**Електричні машини**» передбачено самостійне виконання індивідуального завдання самопідготовки до виконання якого вони приступають під час вивчення теоретичної частини

курсу.

Методичні вказівки, розроблені відповідно до робочої програми (силабус) дисципліни та включають в себе такі частини як: самостійна робота здобувача вищої освіти; організація самостійної роботи; проміжковий контроль знань за результатом роботи виконання самостійного завдання; перелік тем для самостійної роботи; які потрібні для пояснення виконання індивідуального завдання самостійної роботи.

Завдання (тести) для самоконтролю знань виносяться поряд з навчальним матеріалом, який вивчається під час аудиторних занять.

1. ТЕМА СПРОЩЕНІ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТА ВЕКТОРНО-ПОТЕНЦІАЛЬНІ ДІАГРАМИ ТРАНСФОРМАТОРА

1.1. Т-подібна схема заміщення (рис. 2.8, б) при розрахунках дає результати високої точності, яка на практиці непотрібна. Векторні діаграми (рис. 2.9), що будується за цією схемою досить складні, тому їх найчастіше взагалі неможливо використати для практичних розрахунків. Враховуючи все це, розрахунки трансформатора проводяться за спрощеними схемою заміщення та векторною діаграмою.

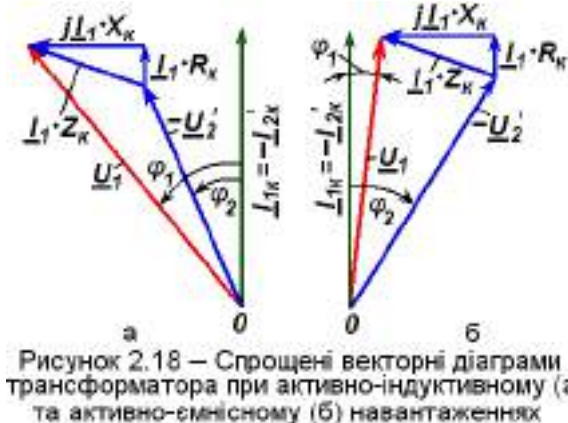


Спрощення схеми заміщення базується на тому, що при режимах роботи трансформатора близьких до номінального, струми в його обмотках набагато перевищують значення струму НХ $i_0 = (0,8...10) \%$. Якщо знехтувати цим струмом (вважати, що $i_0 = 0$, і відповідно $Z_m = \infty$), то схема заміщення трансформатора не буде мати намагнічувальної вітки (рис. 2.17).

Для цієї схеми $R_k = R_1 + R_2'$ та $X_k = X_1 + X_2'$ визначаються в досліді КЗ, а рівняння напруги буде мати вигляд:

$$\underline{U}_1 = -\underline{U}_2' + \underline{I}_1 \cdot R_k + j\underline{I}_1 \cdot X_k. \quad (1.1)$$

У відповідності зі спрощеною схемою заміщення, згідно з рівнянням (2.66), будуються спрощені векторно-потенціальні діаграми (рис. 2.18).



Побудова таких діаграм досить проста. Спершу в довільному напрямі відкладається відомий вектор струму $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'$, який відстає (випереджує) на кут φ_2 (характер навантаження, наприклад активно-індуктивний або активно-емісний, а отже і кут φ_2 при побудові діаграми вважаються відомими, як і опори КЗ) вектор зведеної напруги $-\underline{U}_2'$, до кінця якого, відповідно паралельно та перпендикулярно до струму $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'$, відкладаються вектори падінь напруги на активному $\underline{I}_1 \cdot R_k$ та індуктивному $j\underline{I}_1 \cdot X_k$ опорах КЗ трансформатора. Результатний вектор – є вектор підведеної напруги $\underline{U}_1$, що на кут φ_1 випереджує (відстає) струм $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'$.

1.2. ЗМІНА ВТОРИННОЇ НАПРУГИ ТРАНСФОРМАТОРА ТА ЙОГО ЗОВНІШНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При роботі трансформатора під навантаженням його вторинна напруга U_2 змінюється пропорційно зміні навантаження. Так, при номінальній первинній напрузі і відсутності навантаження (НХ), вторинна напруга $U_2 = U_{2\text{ном}}$ (див. 2.1.2), а при навантаженні

$$U_2 = U_{2\text{ном}} - \Delta U, \quad (1.2)$$

де ΔU – зміна вторинної напруги, В.

Зміна вторинної напруги є важливим показником роботи трансформатора, тому що визначає якою буде вторинна напруга при заданому навантаженні. Вона може бути розрахована для реального трансформатора як в іменованих одиницях, В:

$$\Delta U = U_{2\text{ном}} - U_2, \quad (1.3)$$

так і у відсотках:

$$\Delta u = (U_{2\text{ном}} - U_2) \cdot 100 / U_{2\text{ном}}. \quad (1.4)$$

Формула (2.67) виражає лише фізичну суть зміни вторинної напруги, тому для її розрахунку виводиться значення ΔU через каталожні дані трансформатора. Для цього використовуються спрощені схема та векторно-потенціальна діаграма трансформатора. Зі спрощеної схеми (рис. 2.17) випливає, що

$U_2' = U_{1\text{ном}} - I_1 \cdot Z_k$, а отже ΔU для зведеного трансформатора – це алгебраїчна різниця між напругами:

$$\Delta U = U_{1\text{ном}} - U_2', \quad (1.5)$$

визначити яку можна, провівши нескладну побудову, на спрощеній векторно-потенціальній діаграмі (рис. 2.19).

Вектор напруги $-U_2'$ продовжується на відрізок $\underline{ab}$, який, з певними допущеннями, можна вважати шуканим падінням вторинної напруги. Точка b отримана шляхом перенесення розтином циркуля вектора $\underline{U}_1$ (відрізок $\underline{od}$) на продовження вектора $-U_2'$ (при цьому для спрощення розрахунків вважається, що кут $\angle b$ прямий). На відрізок $\underline{ab}$ опускається перпендикуляр з кінця вектора $\underline{U_{ka}} = I_1 \cdot R_k$ в точку c . З допущеннями можна вважати, що $\Delta U_{\text{ном}} = \underline{ab} = \underline{ac} + \underline{cb}$, де $\underline{ac} = U_{ka} \cdot \cos \varphi_2$; $\underline{cb} = U_{kp} \cdot \sin \varphi_2$, тоді $\Delta U_{\text{ном}}$, В:

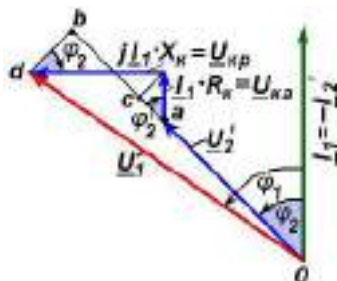


Рисунок 2.19 – Векторна діаграма до визначення зміни напруги

$$\Delta U_{\text{ном}} = U_{ka} \cdot \cos \varphi_2 + U_{kp} \cdot \sin \varphi_2, \quad (1.6)$$

або у відсотках $\Delta u_{\text{ном}}$:

$$\Delta u_{\text{ном}} = u_{\text{ка}} \cdot \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \cdot \sin \varphi_2, \quad (1.7)$$

де $u_{\text{ка}} = (P_k / S_{\text{ном}}) \cdot 100$; $u_{\text{кр}} = \sqrt{u_{\text{к}}^2 - u_{\text{ка}}^2}$ – активна та реактивна складові частини напруги КЗ, визначені за каталожними даними трансформатора у відсотках.

Формули (2.71) та (2.72) дозволяють визначити зміну напруги лише для номінального режиму роботи трансформатора, щоб отримати будь-яке поточне значення зміни напруги, ці формули домножуються на коефіцієнт навантаження $\beta = I_2 / I_{2\text{ном}}$:

$$\Delta U = \beta \cdot (U_{\text{ка}} \cdot \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \cdot \sin \varphi_2) \quad (1.8)$$

Із виразу (2.73) витікає, що зміна вторинної напруги ΔU залежить не лише від величини навантаження β трансформатора, а і від характеру цього навантаження.

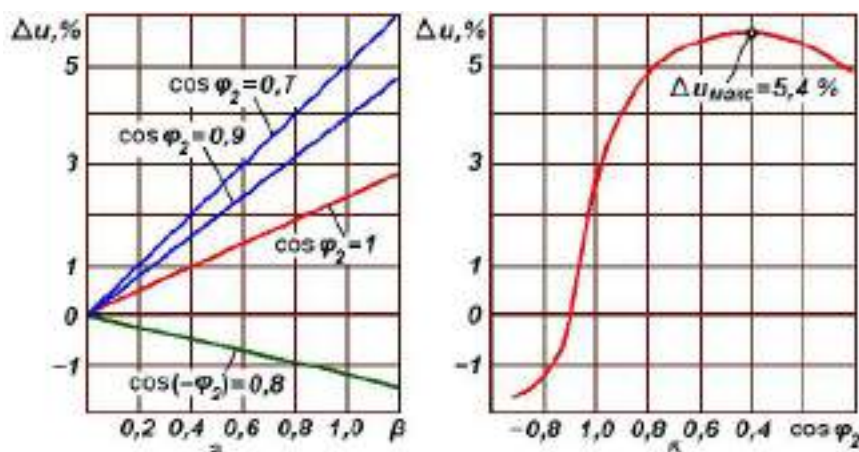


Рисунок 2.20 – Залежність зміни напруги від величини навантаження (а) та від коефіцієнта навантаження (б) трансформатора ТМ 100/6,3/0,22

На (рис. 2.20, а) поданий графік залежності $\Delta u = f(\beta)$ при незмінних різних характерах навантаження (активно-індуктивне – $\cos \varphi_2 = 0,7$ та $\cos \varphi_2 = 0,9$; активне – $\cos \varphi_2 = 1$, а також активно-ємнісне – $\cos(-\varphi_2) = 0,8$) силового трансформатора ТМ 100/6,3/0,22, а на (рис.2.20, б) – графік $\Delta u = f(\cos \varphi_2)$ при $\beta = 1 = \text{const}$ цього ж трансформатора. На цих графіках від'ємні значення Δu

при роботі з активно-ємнісним навантаженням відповідають підвищенню напруги при переході від режиму НХ до навантаження.

Якщо врахувати, що $U_{\text{ка}} = U_{\text{к}} \cdot \cos \varphi_{\text{к}}$; $U_{\text{кр}} = U_{\text{к}} \cdot \sin \varphi_{\text{к}}$ можна отримати ще одну формулу для визначення ΔU :

$$\Delta U = \beta \cdot U_{\text{к}} \cdot (\cos \varphi_{\text{к}} \cdot \cos \varphi_2 + \sin \varphi_{\text{к}} \cdot \sin \varphi_2) = \beta \cdot U_{\text{к}} \cdot \cos(\varphi_{\text{к}} - \varphi_2) \quad (1.9)$$

Із (2.74) витікає, що найбільшою зміна напруги буде при рівності кутів КЗ та навантаження $\varphi_{\text{к}} = \varphi_2$, $\cos(\varphi_{\text{к}} - \varphi_2) = 1$.

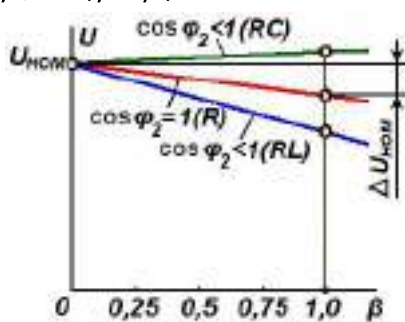


Рисунок 2.21 – Зовнішні характеристики трансформатора

За формулами (2.67) та (2.73), чи (2.74), будуються *зовнішні характеристики трансформатора – залежність вторинної напруги U_2 від струму навантаження I_2* . На (рис. 2.21) вони представлені при різних, за характером, навантаженнях.

Характеристики $U_2 = f(\beta)$ при активному $\cos \varphi_2 = 1$ (R) та активно-індуктивному $\cos \varphi_2 < 1$ (RL) навантаженнях спадають. При цьому більш значне падіння напруги при активно-індуктивному навантаженні, в порівнянні з “чисто” активним, пояснюється розмагнічувальним характером індуктивного струму. Графік зовнішньої характеристики при активно-ємнісному $\cos \varphi_2 < 1$ (RC) навантаженні зростає, що можна легко пояснити намагнічувальною дією ємнісного струму вторинної обмотки трансформатора.

Зовнішню характеристику силового трансформатора можна побудувати за його паспортними даними шляхом розрахунку ΔU для різних значень β та $\cos \varphi_2$, враховуючи задані в паспорті значення параметрів дослідного КЗ.

2. ТЕМА ЯВИЩА, ЩО МАЮТЬ МІСЦЕ ПРИ НАМАГНІЧУВАННІ ТРАНСФОРМАТОРА

Як уже зазначалось, основний магнітний потік створюється у трансформаторі намагнічувальним струмом, що протікає по первинній обмотці. При трансформуванні трифазного струму трансформаторною групою намагнічувальні струми в кожній фазі будуть однакові і симетричні, тобто, зсунуті на кут у 120° . Однак, використання трифазних груп нераціонально через значні габарити, велику вагу і підвищену вартість, тому вони застосовуються лише при значних потужностях, щоб знизити вагу і габарити одиниці обладнання, що важливо при транспортуванні і монтажу трансформаторів.

Більш широко використовуються трифазні трансформатори з розташованими трьома стрижнями осердя в одній площині і з'єднаними двома ярмами (рис. 2.25, а).

Так як до первинної обмотки підведена симетрична система напруг $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$, то, відповідно, магнітні потоки $\underline{\Phi}_A, \underline{\Phi}_B, \underline{\Phi}_C$ також утворюють симетричну систему (рис. 2.25, б). Але, враховуючи те, що

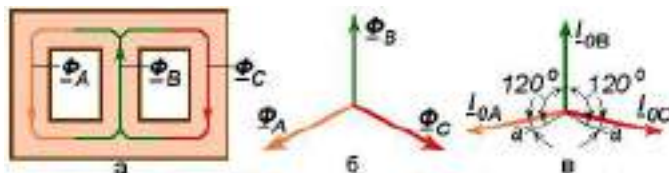


Рисунок 2.25 – Тристрижневий магнітопровід (а) та векторні діаграми зсуву магнітних потоків фаз (б) і намагнічувальних струмів (в)

площинна магнітна система несиметрична, намагнічувальні струми в крайніх фазах I_{OA} і I_{OC} будуть більшими, ніж в середній I_{OB} , а отже, матимуть зсув по фазі відносно власних потоків на кут α . Тобто, при використанні трифазного трансформатора, симетрична система напруг викликає в обмотках

несиметричну систему струмів НХ (рис. 2.25, в).

Для зниження магнітної не симетрії тристрижневого осердя, тобто, зниження магнітного опору крайніх фаз, переріз ярм виконується на (10 – 15) % більшим, ніж стрижнів. Слід зазначити, що несиметричність намагнічувальних струмів, практично, не впливає на роботу трансформатора, тому що, навіть, при незначному навантаженні, різниця між величинами струмів I_A, I_B , та I_C непомітна.

Синусоїдальна напруга, підведена до первинної обмотки, викликає такий же синусоїдальний потік (2.7). Але враховуючи насиченість магнітної системи, намагнічувальний струм i_{op} при цьому виявляється несинусоїдальним. Для визначення

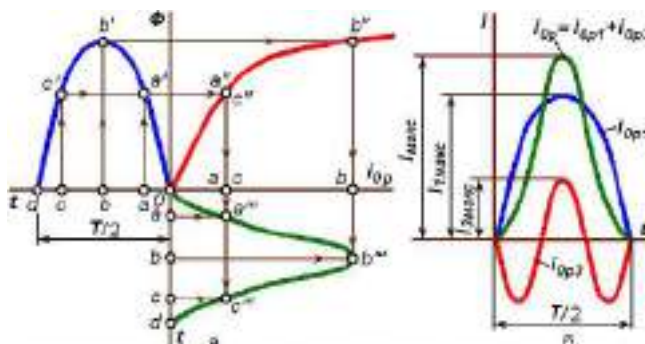


Рисунок 2.26 – Побудова графіка намагнічувального струму (а) та розкладання його на складові першу і третьо гармонічні (б)

Переносячи точки a, b, c дна криву намагнічування (a'', b'', c''), а з неї – в четвертий квадрант, будується графік зміни $i_{op} = f(t)$.

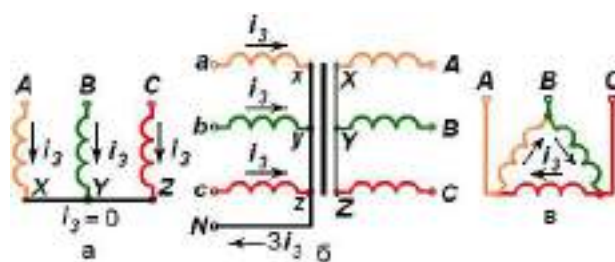
Отриманий намагнічувальний струм має досить загострену форму (рис. 2.26, б), тобто при розкладанні в гармонічний ряд в його кривій мають місце гармоніки кратні трьом. З математики відомо, що будь-яку криву, яка періодично змінюється, можна представити як суму синусоїд (гармонік). Перша з них має частоту таку, як і частота несинусоїдальної кривої, а наступні (вищі) – в порядковий номер більшу. Так, якщо перша гармоніка має $f_1 = 50$ Гц то, наприклад, третя – $f_3 = (50 \times 3) = 150$ Гц. В залежності від насичення сталі зростає й амплітуда вищих гармонік, так у магнітопроводі трансформатора з високолегованої сталі при індукції $B = 1,4$ Тл амплітуда третьої гармоніки складає близько 30 % від амплітуди першої. Несинусоїдальність стосується лише реактивної частини струму НХ, його активна частина лишається синусоїдальною, але (зважаючи на незначну долю активного струму НХ, не більше 10 %) можна увесь струм НХ вважати несинусоїдальним.

2.1. ВПЛИВ СХЕМИ СПОЛУЧЕННЯ ОБМОТОК НА РОБОТУ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Розглянемо тепер як саме будуть впливати описані схеми сполучення на процес намагнічування трифазних трансформаторів.

Із визначення вищих гармонік впливає, що миттєві значення струмів третьої гармоніки (потроєна частота) в трифазній системі будь-якої миті співпадають по фазі, що можна виразити такою системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} i_{A3} &= I_{3max} \sin 3\omega t; & (2.1) \\ i_{B3} &= I_{3max} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{3max} \sin 3\omega t; \\ i_{C3} &= I_{3max} \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_{3max} \sin 3\omega t. \end{aligned} \right.$$



а – зірка без нульового проводу; б – зірка з нейтральним виводом; в – трикутник

Рисунок 2.27 – Напрям струмів третьої гармоніки для різних схем сполучення обмоток трифазних трансформаторів

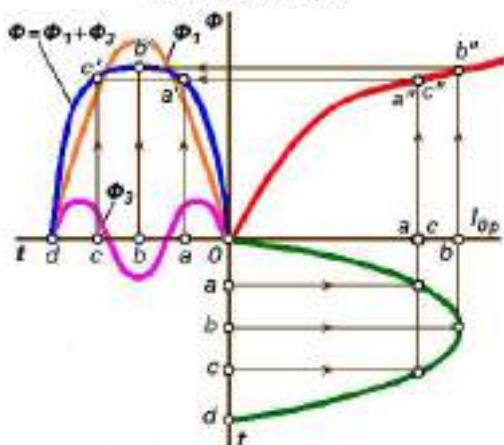


Рисунок 2.28 – Побудова графіка магнітного потоку при синусоїдальній формі намагнічувального струму

Це ж саме буде мати місце і для інших вищих гармонік, кратних трьом – 9; 15 тощо. Ця обставина суттєво впливає на процеси, що відбуваються при намагнічуванні осердя трифазних трансформаторів.

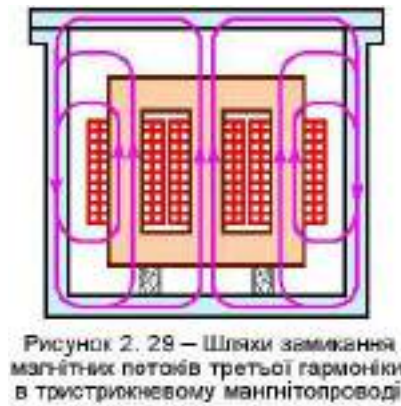
Особливості створення основного магнітного потоку трифазних трансформаторів слід розглядати з урахуванням схем сполучення як первинної так і вторинної обмоток.

Сполучення У/У_n. Якщо первинна обмотка сполучена за схемою **У** без нульового проводу, то струми гармонік кратних трьом, співпадаючи по фазі в кожній із фаз, в сумі складають нуль, що пояснюється відсутністю виходу струмів третьої гармоніки із нульової точки (рис. 2.27, а).

В результаті цього намагнічувальний струм виявиться синусоїдальним, а магнітний потік в осерді трансформатора навпаки – несинусоїдальним (рис. 2.28). Основний магнітний потік у цьому випадку має приплюснуту форму з явно вираженим потоком третьої гармоніки Φ_3 . Ці потоки фази не

можуть замикатись в тристрижневому осердді (як і струми третьої гармоніки при сполученні Y), так як направлені в кожному стрижні будь-якої миті в один і той же бік. Тому вони замикаються через повітря, чи масло, і металеві стінки бака (рис. 2.29), що суттєво знижує їх величину і значення відповідних ЕРС в обмотках. Отже на практиці Φ_3 враховуються лише з точки зору втрат від вихрових струмів, що індукуються цими потоками в стінках бака.

Якщо за схемою Y сполучена група однофазних трансформаторів, то магнітні потоки третьої гармоніки замикаються кожен у своєму магнітопроводі, тому $\Phi_3 \approx (15 - 20) \%$ від Φ_1 . Ці потоки



наводять в фазах несинусоїдальні ЕРС, миттєві значення якої e :

$$e = e_1 + e_3, \quad (2.2)$$

де e_1 та e_3 – миттєві значення ЕРС першої та третьої гармонік відповідно.

Слід відзначити, що амплітуда ЕРС третьої гармоніки в трансформаторній групі досить значна, враховуючи її трикратну частоту, і може складати $\approx (45 - 65) \%$ від амплітуди основної гармоніки. Це призводить до значного зростання амплітуди фазної ЕРС і, як наслідок, до необхідності зміцнення ізоляції фаз.

Що стосується лінійних ЕРС третіх гармонік (наприклад, ЕРС E_{3AB}), то враховуючи, що вони є різницею відповідних фазних і однаково направленість останніх в часі, їх величина рівна нулю.

$$E_{3AB} = E_{3A} - E_{3B} = 0, \quad (2.3)$$

де E_{3A} та E_{3B} – фазні (відповідно фаз A і B) ЕРС третіх гармонік, B .

Якщо первинна обмотка трифазного трансформатора сполучена за схемою Y_n (рис. 2.27, б), то струми гармонік, кратних трьом, будуть протікати у фазах і виходити через нейтральний провід. При цьому магнітний потік, а отже, і ЕРС в фазах будуть синусоїдальними.

Сполучення У/Д чи Д/У. При сполученнях, коли одна із сторін (НН чи ВН) з'єднана в трикутник, недоліки, що мають місце, коли первинні обмотки сполучені за зіркою, відсутні.

Уявимо, що у трикутник сполучені первинні обмотки трансформатора. В цьому випадку струми третьої гармоніки вільно замикаються в замкненому контурі фазних обмоток, сполучених у трикутник, (рис. 2.27, в). Наявність третьої гармоніки в намагнічувальному струмі, виключає її з магнітного потоку, і ЕРС фаз будуть синусоїдальними.

Якщо ж у трикутник сполучені вторинні обмотки, а первинні – в зірку без нульового проводу, то магнітні потоки третьої гармоніки наведуть відповідні ЕРС у вторинній обмотці. Струми третьої

гармоніки, що будуть замикатися в трикутнику цієї обмотки, створять свої магнітні потоки Φ_{23} , що, згідно із правилом Ленца, будуть направлені в осерді назустріч потокам, створеним струмами первинних обмоток Φ_{13} . У підсумку, результатний потік третьої гармоніки, $\Phi_3 = \Phi_{13} + \Phi_{23}$ буде значно ослаблений і, практично, не впливає на властивості трансформатора.

3. ТЕМА РОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ПРАЦЮЮЧИМИ ПАРАЛЕЛЬНО ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Якщо на паралельну роботу увімкнено два, чи більше, трансформаторів з ідеально виконаними умовами паралельної роботи, то навантаження між ними розподілиться пропорційно до їх потужностей.

На практиці, підібрати кілька трансформаторів, які б ідеально підходили для паралельної роботи, досить складно, тому стандартами допускаються деякі відхилення від перерахованих вище умов.

Паралельна робота двох трансформаторів при різних коефіцієнтах трансформації. Згідно зі стандартом допускається паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації, якщо нерівність між коефіцієнтами трансформації $\Delta K = K_I - K_{II}$ не перевищує 0,5 % від їх середньо геометричного значення $\sqrt{K_I \cdot K_{II}}$:

$$\Delta K \leq 0,005 \sqrt{K_I \cdot K_{II}} \quad (3.1)$$

Таке незначне розходження між коефіцієнтами трансформації пояснюється тим, що в цьому випадку, навіть в режимі НХ, між трансформаторами, що увімкнені паралельно, виникає зрівняльний струм $I_{зр}$, зумовлений різницею вторинних напруг ΔU :

$$\Delta U = |U_1/K_I - U_1/K_{II}| \quad (3.2)$$

$$I_{зр} = \Delta U / (Z_{kI} + Z_{kII}), \quad (3.3)$$

де $Z_{kI}; Z_{kII}$ – опори КЗ відповідно першого та другого трансформаторів, Ом.

Зрівняльний струм навантаження співпадає зі струмом навантаження того трансформатора, у якого менший коефіцієнт трансформації, перевантажуючи його і направлений назустріч струму навантаження, розвантажуючи трансформатор з більшим коефіцієнтом трансформації. Враховуючи, що перевантаження трансформатора недопустимо, загальне навантаження в таких випадках необхідно знижувати.

Паралельна робота трансформаторів з різними напругами КЗ. Така робота допускається лише тоді, коли різниця між напругами КЗ $\Delta u_k = u_{kI} - u_{kII}$ не перевищує 10 % від їх середньоарифметичного значення:

$$\Delta u_k \leq 0,1 u_{k \text{ ср}}, \quad (3.4)$$

де $u_{k \text{ ср}} = (u_{kI} + u_{kII})/2$ – середньоарифметичне значення напруг КЗ у відсотках.

При різних напругах КЗ у трансформаторів буде різне падіння вторинної напруги ΔU (2.74), але вторинні напруги U_2 , завдяки ввімкненню на єдині шини, будуть рівними, тобто справедливе рівняння:

$$I_I \cdot Z_{kI} = I_{II} \cdot Z_{kII} = \dots I_n \cdot Z_{kn}, \quad (3.5)$$

де I_I, I_{II}, I_n – струми навантаження, а Z_{kI}, Z_{kII}, Z_{kn} – повні опори КЗ паралельно увімкнених трансформаторів. Із (2.94) випливає, що величина струму навантаження працюючих паралельно трансформаторів буде зворотно пропорційна їх повним опорам КЗ.

Напругу КЗ трансформатора можна розглядати як повний опір трансформатора у відносних одиницях, тому схему заміщення паралельної роботи трансформаторів можна зобразити у вигляді паралельно увімкнених опорів, що позначають напруги КЗ у відносних одиницях (рис. 2.37). Отже, більший струм навантаження буде мати той трансформатор, у якого менший опір, тобто напруга КЗ, і навпаки.



Виходячи з цього, навантаження при різних напругах КЗ розподіляється зворотно пропорційно напругам КЗ паралельно увімкнених трансформаторів за такою формулою:

$$S_i = S_{\text{заг}} \cdot S_{\text{ном } i} / [u_{ki} \cdot \sum (S_{\text{ном } i} / u_{ki})], \quad (3.6)$$

де S_i – навантаження i -того трансформатора, Вт; $S_{\text{заг}}$ – загальне навантаження трансформаторів, Вт; $S_{\text{ном } i}, u_{ki}$ – номінальна потужність і напруга КЗ i -того трансформатора. У знаменнику виразу (2.94) сума $\sum (S_{\text{ном } i} / u_{ki})$ може бути визначена як:

$$\sum (S_{\text{ном } i} / u_{ki}) = (S_{\text{ном } I} / u_{kI}) + (S_{\text{ном } II} / u_{kII}) + \dots (S_{\text{ном } n} / u_{kn}), \quad (3.7)$$

де $S_{\text{ном } I}, S_{\text{ном } II}, S_{\text{ном } n}, u_{kI}, u_{kII}, u_{kn}$ – номінальні потужності та напруги КЗ першого, другого та n -ого трансформаторів.



Паралельна робота трансформаторів при різних схемах та групах сполучення. Така робота не допускається, тому що зрівняльні струми, які виникають через фазовий зсув вторинних напруг, досить значні – такі, що іноді перевищують струми аварійних КЗ. Величина цього струму визначається у відповідності з (2.92). При цьому різниця напруг ΔU (рис. 2.38) викликана фазовим зсувом визначається формулою:

$$\Delta U = 2 U_{2\phi} \cdot \sin(\alpha/2), \quad (3.8)$$

де α – кут зсуву між фазними вторинними напругами першого U_{2I} та другого U_{2II} трансформаторів.

Очевидно, що не сфазовані трансформатори (наприклад, затискач фази А з'єднати із затискачем фази В або С) не зможуть працювати через струми КЗ, які будуть мати місце при цьому [згідно з (2.97) $\Delta U = \sqrt{3} U_{2I}$ – тобто дорівнює лінійній напрузі, адже $\alpha = 120^\circ$, а $\sin(\alpha/2) = \sqrt{3}/2$].

Якщо потужності трансформаторів відрізняються більше ніж у 3 рази, то паралельна робота між ними не має сенсу, тому що трансформатор меншої потужності, маючи менше значення напруги КЗ, може виявитись значно перевантаженим і необхідно буде суттєво знижувати загальне навантаження.

4. ТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Щоб забезпечити стабільність електропостачання споживачів, вихідну напругу силового трансформатора, враховуючи зміну вторинної напруги при роботі його під навантаженням та спадання напруги в лініях, необхідно регулювати. Будь-яка зміна стану роботи трансформатора супроводжується перехідним процесом. Питанням, пов'язаним з регулюванням напруги та перехідними процесами, надається значна увага в процесі експлуатації трансформаторів.

4.1. РЕГУЛЮВАННЯ ВТОРИННОЇ НАПРУГИ ТРАНСФОРМАТОРА

При експлуатації трансформатора досить часто виникає потреба змінювати величину вторинної напруги. Найчастіше це пов'язано з необхідністю стабілізації напруги за рахунок незначної (в межах від 5 до 10 %) зміни первинної напруги, викликаній падінням напруги в лініях та потребою регулювання вторинної напруги (через особливості технологічного процесу) в певних межах при незмінній (чи мало змінюваній) первинній напрузі. В будь-якому разі регулювання вторинної напруги здійснюється зміною коефіцієнта трансформації трансформатора, тобто співвідношенням між числами витків первинної і вторинної обмоток.

Якщо необхідність регулювання викликана зміною первинної напруги, то найпростіше змінювати число витків первинної обмотки (з цією метою в обмотці виконуються відповідні відгалуження) так, щоб намагнічувальна сила, а отже магнітний потік і ЕРС витка залишалися незмінними. Так як число витків вторинної обмотки не змінилось, не зміниться і ЕРС цієї обмотки і її напруга.

При необхідності значного регулювання вторинної напруги при незмінній первинній напрузі, слід змінювати число витків вторинної обмотки. Змінювати число витків первинної обмотки у цьому випадку не можна, тому що це викличе зміну магнітного потоку трансформатора і, як наслідок, або до його перегрівання, або до поганого використання.

Перемикання відгалужень обмоток найчастіше може здійснюватись у відімкненому від мережі трансформаторі, таке перемикання називається перемиканням без збудження (ПБЗ), або у навантаженому – тоді воно називається регулюванням під навантаження (РПН).

4.2. Перемикання відгалужень без збудження. Таке регулювання застосовується у сухих і масляних силових трансформаторах загально промислового призначення, а також у силових трансформаторах, що працюють з випрямлячами або інверторами. Напруга регулюється на $\pm 5\%$ від номінальної напруги зі ступінчастістю $2,5\%$, тобто трансформатор має відгалуження на п'ять різних (включаючи номінальну) напруг. В трансформаторах порівняно незначної потужності може бути тільки три відгалуження ($+5; 0; -5\%$). Найчастіше в силових трансформаторах регулювальні витки виконуються в обмотці ВН, що дозволяє спростити конструкцію перемикача за рахунок менших, ніж в

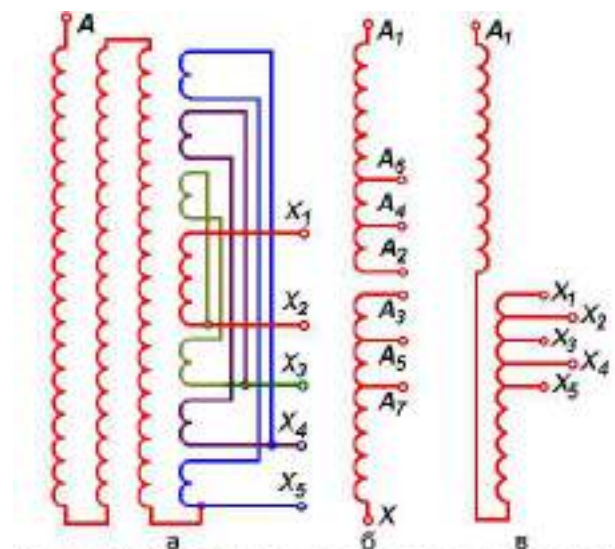


Рисунок 2.43 – Схеми розташування регулювальних відгалужень в багатопаровій (а) та безперервній [пряма (б) і оборотна (в)] обмотках

обмотці НН, струмів. Крім того, більше число витків обмотки ВН дозволяє виконати зміну напруги з більшою точністю. В силових трансформаторах, що працюють з випрямлячами або інверторами, часто напруга регулюється з боку НН; при цьому перемикальна апаратура виконується на значні струми, що досить ускладнює її конструкцію.

При регулюванні напруги частина витків однієї з обмоток відмикається, що веде до порушення рівномірності розподілу МРС по висоті обмотки, а це, в свою чергу, до спотворення магнітного поля розсіювання і появи електродинамічних сил, які стискають або розтягують обмотку в осьовому напрямі. Ці сили особливо небезпечні при аварійних КЗ і можуть навіть зруйнувати обмотку. Тому регулювальну

зону обмотки намагаються рівномірно розподілити по висоті обмотки, або виконати в середині, симетрично відносно обох ярем. У трифазних трансформаторах порівняно незначної потужності сполучених за схемою **У**, враховуючи незначні електродинамічні зусилля, регулювальні витки доцільно виконати біля заземленої нульової точки, що спростить ізоляцію перемикача. Якщо відгалуження розташовані в середній зоні обмотки (в потужних трансформаторах), то перемикачі виконуються з підсиленою ізоляцією і високою точністю дії, тому що неузгоджена робота елементів перемикача при високій напрузі може призвести до серйозних аварій.

В трансформаторах з багатопаровою циліндричною обмоткою (рис. 2.5, а) витки, що відмикаються, звичайно розташовуються на кінці обмотки у зовнішньому шарі симетрично відносно обох ярем (рис. 2.43, а). При переході з одного відгалуження $X_1 - X_5$ на інше відмикається рівна кількість витків від центру обмотки. У безперервних обмотках (рис. 2.5, б) відгалуження $A_2 - A_7$ розташовуються в середній частині (рис. 2.43, б). При номінальній напрузі до 35 кВ може використовуватись зворотна схема (рис. 2.43, в), що дозволяє розташувати відгалуження біля нульової точки і одночасно в середині обмотки по висоті. При такій схемі частини обмоток мають різний напрямок намотування.

В масляних трансформаторах перемикання звичайно здійснюється контактним перемикачем, що розташовується безпосередньо в баці, а ручка його привода на кришці. В сухих трансформаторах відгалуження виводяться на панель і перемикання здійснюється перестановкою контактних пластин на різні вивідні шпильки.

4.3. Перемикання відгалужень під навантаженням. Для підвищення гнучкості і зручності керування крупними електричними мережами і системами має велике значення можливість регулювання напруги трансформаторів без перерви навантаження. Випускаються такі трансформатори всіх потужностей від 63 до 250000 кВ·А з межами регулювання $\pm (10 - 16)\%$.

Для здійснення регулювання під навантаженням необхідно:

- забезпечити перехід з одного відгалуження на інше без розривання струму, для чого на деякий час мають бути ввімкнені два сусідні відгалуження;
- обмежити струм КЗ в тій частині обмотки трансформатора, що розташована між відгалуженнями, які ввімкнені одночасно;
- узгодженість роботи всіх елементів перемикальних пристроїв.

Здійснюється регулювання напруги трансформатора під навантаженням пристроями РПН з дистанційним керуванням та струмообмежувальними резисторами або реакторами. Схема роботи останнього зображена на (рис. 2.44). Пристрій складається з реактора P , двох контакторів K_1 та K_2 , призначених для розмикання струму, що протікає по двох паралельних вітках струмообмежувального реактора та двох перемикачів Π_1 та Π_2 , які виконують перемикання під час безструмової паузи. Перемикання з відгалуження X_1 (рис. 2.44, а) на відгалуження X_2 (рис. 2.44, ж) відбувається у послідовності, показаній на (рис. 2.44, б – є).

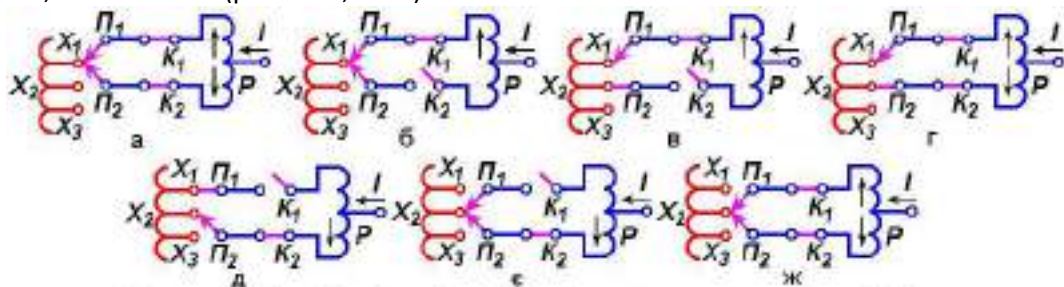


Рисунок 2.44 – Послідовність (а – ж) перемикання пристрою РПН зі струмообмежувальним реактором

Реактор і перемикачі розміщуються всередині масляного бака, а контактори – в спеціальному бачку, що встановлюється зовні на стінці бака. Масло, що заповнює цей бачок, забруднюється при розмиканні контактів і тому не сполучується з маслом основного бака.

Робота РПН, що має струмообмежувальний резистор, відрізняється конструктивно від РПН з реактором, але принцип роботи у них аналогічний.

Розглянуті принципи перемикання дозволяють здійснювати ступінчасте регулювання вторинної напруги. Плавне регулювання напруги здійснюється у трансформаторах порівняно незначної потужності. Для цього використовуються трансформатори з ковзним контактом (контактна щітка рухається оголеною частиною обмотки), з рухомою вторинною обмоткою (рухомий стрижень із вторинною обмоткою дозволяє плавно змінювати взаємодуктивність між обмотками, а отже і ЕРС E_2) та трансформатори, що регулюють напругу підмагнічуванням шунтів (плавна зміна вторинної напруги здійснюється шляхом підмагнічування магнітопроводу постійним струмом).

5 ТЕМА ТРИБМОТКОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ ТА АВТОТРАНСФОРМАТОРИ

В лініях електропередач крім звичайних двообмоткових трансформаторів досить часто застосовуються триобмоткові трансформатори та автотрансформатори, що дозволяє значно знизити затрати при виробництві трансформаторів та трансформуванні електричної енергії.

5.1. ТРИБМОТКОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ

Триобмотковим трансформатором називається такий трансформатор, у якого в кожній фазі, що трансформується, є три (а не дві, як у звичайного) обмотки (рис. 2.39), третя обмотка називається в цьому випадку обмоткою *середньої напруги* (СН).

За номінальну потужність триобмоткового трансформатора приймається потужність тієї обмотки, яка в процесі роботи найбільше навантажується. Розглядаючи роботу триобмоткового трансформатора саме цю обмотку вважають первинною, а дві інші – вторинними. Найчастіше в сучасних триобмоткових трансформаторах усі три обмотки розраховані на однакову потужність, або одна, чи дві, мають лише на 2/3 номінальної потужності. Триобмотковий трансформатор може бути, як і звичайний двообмотковий, знижувальним або підвищувальним. Якщо первинною обмоткою триобмоткового трансформатора є обмотка СН (що найбільш доцільно при її розташуванні між обмотками ВН та НН), то він одночасно є і підвищувальний і знижувальний. Прикладом такого використання може служити трансформатор, обмотка СН якого живиться від обмотки генератора електростанції, обмотка ВН увімкнена в лінію електропередач, а НН – живить власні потреби електростанції. Слід зазначити, що це установки значної потужності, а тому в них можуть використовуватись трансформаторні групи однофазних триобмоткових трансформаторів.

Принцип дії триобмоткового трансформатора нічим не відрізняється від принципу дії двообмоткового, за винятком того, що при роботі такого трансформатора створюються дві вторинні ЕРС $\underline{E}_2$ та $\underline{E}_3$ і під навантаженням результатний магнітний потік $\underline{\Phi}_0$ на відміну від (2.5) створюється намагнічувальними силами усіх трьох обмоток:

$$\underline{\Phi}_0 = \underline{\Phi}_1 + \underline{\Phi}_2 + \underline{\Phi}_3, \quad (5.1)$$

де $\underline{\Phi}_3$ – магнітний потік третинної обмотки, Вб.

По аналогії з двообмотковим трансформатором (2.22) записуються рівняння намагнічувальних сил і струмів:

$$\underline{I}_0 \cdot W_1 = \underline{I}_1 \cdot W_1 + \underline{I}_2 \cdot W_2 + \underline{I}_3 \cdot W_3; \quad (5.2)$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2' + \underline{I}_3'; \quad (5.3)$$

$$\underline{I}_2' = \underline{I}_2 / k_{12}; \quad \underline{I}_3' = \underline{I}_3 / k_{13}, \quad (5.4)$$

де $k_{12} = W_1 / W_2$, $k_{13} = W_1 / W_3$ – коефіцієнти трансформації між первинною W_1 і вторинними обмотками W_2 та W_3 відповідно. Існує також і третій коефіцієнти трансформації $k_{23} = W_2 / W_3 = k_{13} / k_{12}$ – між самими вторинними обмотками. Дослідним шляхом, згідно стандарту, коефіцієнти трансформації триобмоткового трансформатора визначаються в досліді НХ, тобто так, як і у двообмотковому трансформаторі.

Нехтуючи струмом НХ $\underline{I}_0$, можна отримати спрощене рівняння струмів триобмоткового трансформатора:

$$\underline{I}_1 \approx -(\underline{I}_2' + \underline{I}_3'). \quad (5.5)$$

Обмотки триобмоткового трансформатора розташовують на стрижні осердя концентрично, при цьому найбільш раціональне розташування, коли первинна обмотка розташовується між вторинними, наприклад, обмотка НН безпосередньо на стрижні, обмотка СН на ній (первинна) і зовні обмотка ВН (рис. 2.39, б). Таке розташування обмоток дозволяє знизити взаємний вплив вторинних обмоток і суттєво знизити потоки розсіювання.

Дослід КЗ триобмоткового трансформатора необхідно проводити три рази: 1) між обмотками ВН і СН, при розімкненій обмотці НН; 2) між обмотками ВН і НН, при розімкненій обмотці СН; 3) між обмотками СН і НН, при розімкненій обмотці ВН. Відповідно має місце три напруги КЗ, які

залежать від розміщення обмоток на стрижні. Найбільшою буде напруга u_k між найвіддаленішими обмотками [на (рис. 2.39, б) між ВН та НН], так як у цьому випадку потоки розсіювання досягають найбільшого значення. Пропорційними напругам КЗ, як і двообмоткового трансформатора (2.74), будуть і падіння напруги ΔU у вторинних обмотках при навантаженні.

Найчастіше для триобмоткових трансформаторів застосовуються такі схеми та групи сполучення: $Y_n/Y_n/D-0-11$ та $Y_n/D/D-11-11$.

Експлуатаційну доцільність використання триобмоткового трансформатора можна пояснити співвідношенням (2.102), адже первинний струм триобмоткового трансформатора дорівнює не арифметичній, а геометричній сумі зведених вторинних струмів. Враховуючи це, а також і те, що навантаження вторинних обмоток досягає номінального значення, як правило, неодноразово, первинну обмотку можна мати меншої потужності, ніж арифметичну суму номінальних потужностей обох вторинних обмоток. Ще однією перевагою триобмоткового трансформатора є те, що він фактично замінює два двообмоткові. В цьому випадку економія матеріалів при його виготовленні очевидна: замість чотирьох обмоток необхідно лише три, одна магнітна система замість двох, один бак тощо.

5.2. АВТОТРАНСФОРМАТОРИ

Автотрансформатор – це такий трансформатор, у якого окрім магнітного зв'язку між обмотками є ще і електричний, тобто обмотка НН є складовою частиною обмотки ВН. Обмотки звичайного трансформатора можна ввімкнути за автотрансформаторною схемою, для чого необхідно відвід X з'єднати з відводом a (рис. 2.40). Якщо до відводів Ax підвести напругу мережі, а до відводів ax ввімкнути навантаження Z_n , то отримаємо знижувальний автотрансформатор, якщо ж навпаки (до ax підвести напругу мережі, а до Ax ввімкнути навантаження) – підвищувальний.

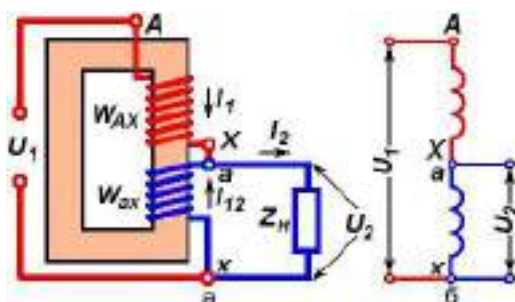


Рисунок 2.40 – Електромагнітна (а) та електрична (б) схеми однофазного знижувального автотрансформатора

Враховуючи електричний і магнітний зв'язок між обмотками автотрансформатора, потужність у автотрансформатора, на відміну від трансформатора, передається від мережі до навантаження двома шляхами: електричним та магнітним. Розглянемо роботу знижувального автотрансформатора (рис. 2.40, а). Струм навантаження I_2 згідно з другим правилом Кірхгофа:

$$I_2 = I_1 + I_{12}, \quad (5.6)$$

де I_1 – струм, що споживається з мережі і протікає через навантаження завдяки електричному зв'язку між мережею і навантаженням, I_{12} – струм, який створює наведена у вторинній обмотці ЕРС.

Помноживши вираз (2.103) на напругу U_2 , отримаємо повну потужність на навантаженні S_{np} :

$$U_2 \cdot I_2 = U_2 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_{12} = S_e + S_p, \quad (5.7)$$

де $U_2 \cdot I_2 = S_{np}$ – *прохідна потужність* автотрансформатора, що передається (проходить, звідси назва) від мережі до навантаження; $S_e = U_2 \cdot I_1$ – *електрична потужність*; $S_p = U_2 \cdot I_{12}$ – потужність, що передається електромагнітним шляхом.

Потужність S_p називається *розрахунковою потужністю*, тому що саме на її трансформування розраховується автотрансформатор; потужність S_e не трансформується, а передається завдяки електричному зв'язку між обмотками. Це дає можливість виконувати магнітну систему меншого перерізу ніж у трансформатора рівної потужності і мати економію електротехнічної сталі.

Ще суттєвішою є економія обмоткового матеріалу. По-перше, число витків обмотки автотрансформатора менше, ніж число витків двох обмоток аналогічного трансформатора на число витків вторинної обмотки W_2 . По-друге, переріз провідників обмотки НН автотрансформатора менший ніж переріз провідників відповідної обмотки трансформатора, тому що на ній протікає менший струм $I_{12} = I_2 - I_1$. По-третє, враховуючи менший переріз стрижня, знижується середня довжина витка обмотки. Все це дозволяє знизити затрати міді (алюмінію) при виготовленні автотрансформатора вдвічі при $K = 2$ в порівнянні з трансформатором рівної потужності.

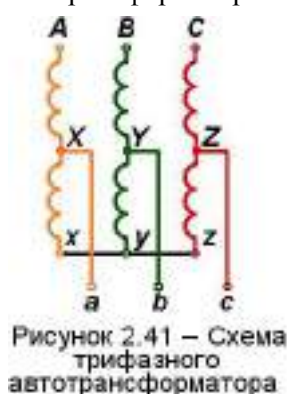
Зниження струму однієї з обмоток, зменшення міді та сталі, знижує електричні та магнітні втрати автотрансформатора при його експлуатації, що відповідно підвищує ККД, який у автотрансформаторів значної потужності досягає 99,7%.

Указані переваги автотрансформаторів тим суттєвіші, чим більша частина потужності S_e , що передається електричним шляхом, в прохідній потужності S_{np} . Легко переконатись, що величина електричної потужності автотрансформатора зворотно пропорційна його коефіцієнту трансформації:

$$S_e = U_2 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 / K = S_{np} / K, \quad (5.8)$$

тобто, при $K = 1$ вся потужність від мережі до навантаження передається електричним шляхом і автотрансформатор, взагалі, не потрібний. При зростанні коефіцієнта трансформації доля електричної потужності в прохідній знижується, а отже, знижуються і переваги автотрансформатора перед трансформатором. Найбільш доцільним є використання автотрансформатора при $K < 2$ для знижувальних автотрансформаторів ($K > 0,5$ для підвищувальних).

При більших значеннях коефіцієнта трансформації переважне значення будуть мати недоліки автотрансформатора:



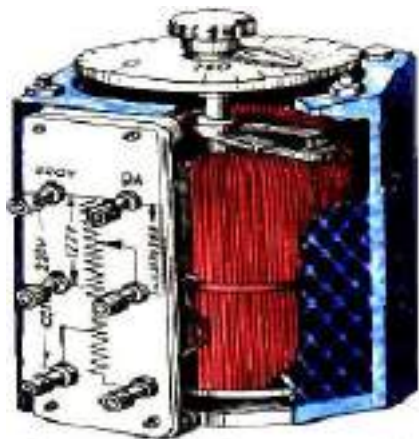
- значні струми КЗ знижувальних автотрансформаторів, тому що точка КЗ виявляється електрично зв'язаною з мережею через незначну кількість витків неспільної частини обмотки, як правило, це призводить до руйнування цієї частини обмотки при аварійних КЗ;

- електричний зв'язок обмоток ВН та НН вимагає підсиленої ізоляції всієї обмотки;

- при використанні автотрансформаторів у схемах зниження напруги між проводами мережі НН та землею виникає напруга, приблизно рівна напрузі між проводом та землею на боці ВН;

- з метою забезпечення електробезпеки обслуговуючого персоналу неможливе застосування автотрансформатора для зниження напруги, що підводиться безпосередньо до споживача.

Силові автотрансформатори широко застосовуються в лініях електропередач і розподілу електроенергії щоб з'єднати мережі суміжних напруг, наприклад 110 і 220, 220 і 500 кВ та інші. Такі автотрансформатори, звичайно виготовляються на значні потужності (до 500 МВА і більше). Обмотки трифазних автотрансформаторів з'єднуються в зірку (рис. 2.41).



Автотрансформатори використовуються в електроприводах змінного струму для зниження пускових струмів двигунів, а також, для регулювання режимів роботи електрометалургійних печей. Автотрансформатори малої потужності застосовують у пристроях радіо, зв'язку і автоматики.

Широке застосування отримали автотрансформатори зі змінним коефіцієнтом трансформації; вони обладнані пристроєм, що дозволяє змінювати число витків вторинної обмотки. Здійснюється це або перемикачем, або за допомогою ковзкого контакту (рис. 2.42) чи щітки, що переміщується безпосередньо по оголених витках обмотки. Такі автотрансформатори називаються *регуляторами напруги*, вони бувають як однофазні

(РНО), так і трифазні (РНТ).

6. ТЕМА ТРАНСФОРМАТОРНІ ПРИСТРОЇ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Поряд з уже розглянутими силовими трансформаторами широко використовуються трансформатори, призначені для роботи, яка не пов'язана безпосередньо з передачею та розподілом електроенергії. До таких трансформаторів відносяться спеціальні силові трансформатори, трансформатори автоматики тощо.

6.1 ТРАНСФОРМАТОРИ ЖИВЛЕННЯ ДУГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧЕЙ

Трансформатори, які живлять дугові електричні печі, так звані, *пічні трансформатори*, багато чим схожі зі звичайними силовими трансформаторами. Їх конструктивні відмінності зумовлені специфічними особливостями роботи дугових електропечей. Кожна така піч живиться, як правило, від окремого трансформатора, потужність якого може сягати $25000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Для забезпечення нормального горіння електричної дуги в печі, вторинна обмотка пічного трансформатора повинна мати, порівняно, низьку напругу (близько $100 - 400 \text{ В}$) при струмі в кілька десятків кА . Такий значний струм можливо отримати лише поділивши провідники обмотки, та відводи від неї, на значну кількість паралельних віток. В процесі плавки металу, в печі відбуваються значні коливання навантаження від КЗ (при опусканні електродів печі для запалювання електричної дуги) до повного зниження струму при розтягуванні і згасанні дуги.

Для зниження струмів КЗ трансформатор має підвищене значення напруги КЗ u_k , або послідовно з первинною обмоткою вмикається струмообмежувальний реактор. Такий реактор, як правило, монтується в одному баці з трансформатором. В установці з пічним трансформатором, струми КЗ в момент запалювання дуги не повинні перевищувати номінальні більше ніж в 2,5 – 4 рази.

Кріплення обмоток пічного трансформатора повинно мати підвищену міцність і виконується з урахуванням саме таких значень струмів КЗ. Щоб покращити керування процесом плавки металу в електропечі, необхідно мати можливість в широких межах регулювати вторинну напругу трансформатора. З цією метою в первинній обмотці виконується низка відводів і, за допомогою відповідних перемикачів, проводяться необхідні перемикання цих відводів. Для збільшення числа ступенів напруги передбачається можливість перемикання обмотки ВН зі схеми трикутника на зірку. Перемикання може здійснюватись як з вимкненим навантаженням (у трансформаторів, порівняно, невеликої потужності) так і без перерви навантаження – у трансформаторів значної потужності.

6.2. ТРАНСФОРМАТОРИ ДЛЯ ДУГОВОГО ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ

Трансформаторний пристрій для дугового електрозварювання найчастіше називається зварювальним трансформатором. Конструктивно такий трансформатор уявляє собою однофазний двообмотковий знижувальний трансформатор, що перетворює напругу мережі 220 чи 380 В у напругу ($60 - 70$) В , яка необхідна для надійного загорання та стійкого горіння електричної дуги між металевим електродом і деталями, які зварюються.

Специфіка роботи зварювального трансформатора, як і пічного, полягає в уривчастому

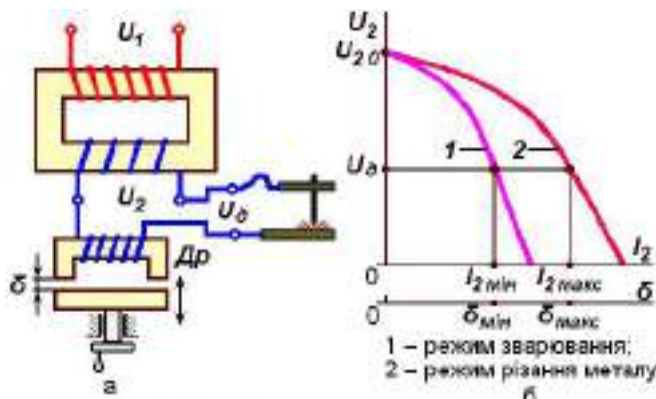


Рисунок 2.48 – Схема увімкнення (а) та зовнішні характеристики зварювального трансформатора

режимі роботи: запалювання електричної дуги супроводжується КЗ вторинного кола трансформатора, а згасання дуги створює режим НХ. Номінальному режиму роботи відповідає стійке неперервне горіння електричної дуги. Для зниження струму при загорянні дуги в зварювальному трансформаторі передбачені шляхи по збільшенню індуктивного опору. З цією метою первинна та вторинна обмотки розташовані (рис. 2.48, а) на різних стрижнях магнітопроводу, що призводить до зростання магнітного розсіювання. Крім цього, послідовно з вторинною обмоткою увімкнено дросель Dp з

розімкнутою магнітною системою і мідною обмоткою з дроту прямокутного перерізу, розташованою на стрижні цієї магнітної системи. Дросель має спеціальний пристрій типу “гвинт – гайка”, що дозволяє регулювати повітряний зазор від $\delta = 0$ до $\delta = \delta_{\max}$. При мінімальному значенні δ індуктивний опір дроселя Dp найбільший, а отже $I_2 = I_{2\min}$, максимальному значенню повітряного зазору $\delta = \delta_{\max}$ відповідає найменше значення індуктивного опору і, як наслідок, максимальний робочий струм $I_2 = I_{2\max}$.

Підвищення індуктивного опору вторинного кола послідовним увімкненням дроселя Dp забезпечує зварювальному трансформатору круто падаючі зовнішні характеристики (рис. 2.48, б) $U_2 = f(I_2)$, необхідні для забезпечення стійкого горіння дуги при будь-яких значеннях робочого струму. Нахил зовнішніх характеристик, як і величина робочого струму зварювального трансформатора, регулюється зміною повітряного зазору, так $\delta = \delta_{\max}$ – крива 1, а $\delta = \delta_{\min}$ – крива 2 на (рис. 2.48, б). Стійке горіння дуги, при робочому струмі $I_{2\text{ном}}$ забезпечується напругою електричної дуги $U_d \approx 30 \text{ В}$.

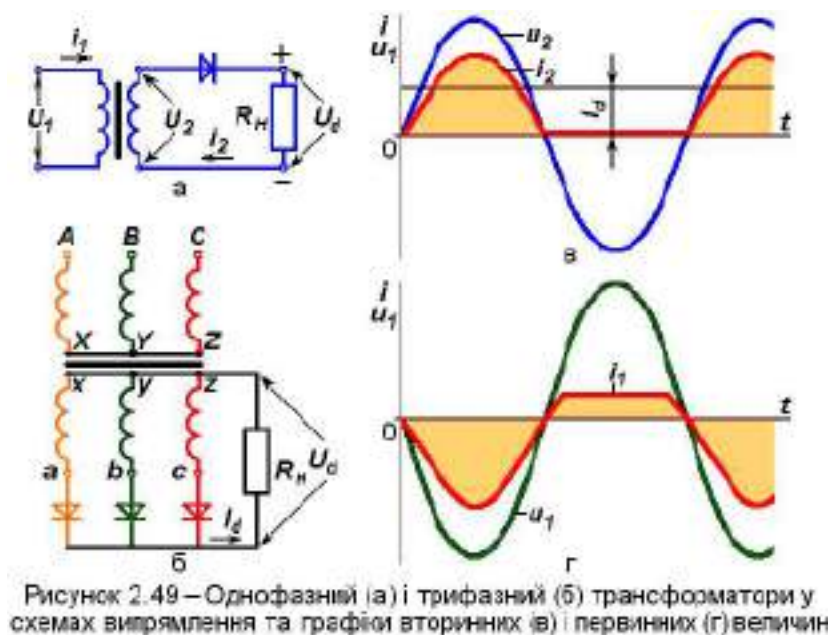
В деяких конструкціях зварювальних трансформаторів дросель суміщається з трансформатором і вони мають спільну магнітну систему. Значний індуктивний опір зварювального трансформатора різко знижує його коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1$, який звичайно не перевищує $0,4 - 0,5$. Враховуючи це, в електропостачанні зварювальних дільниць необхідно передбачати пристрої для компенсації реактивної потужності.

6.3. ТРАНСФОРМАТОРИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ВИПРЯМЛЯЧІВ

В коло вторинної обмотки трансформатора, що живить випрямляючий пристрій, увімкнений елемент з односторонньою провідністю – діод.

На (рис. 2.49, а) надана схема однофазного трансформатора з однонапівперіодним випрямлячем.

Струм вторинної обмотки цього трансформатора i_2 пульсуючий, так як створюється лише додатною півхвилею вторинної напруги u_2 (рис. 2.49, б). Цей струм має дві складові: постійну



$$I_d = (\sqrt{2} / \pi) * (U_2 / R_n) \quad (6.1)$$

та змінну

$$i_{зм} = i_2 - I_d. \quad (6.2)$$

Якщо знехтувати струмом НХ, то рівняння намагнічувальних сил з урахуванням (2.110) можна записати у вигляді:

$$i_1 * W_1 + i_{зм} * W_2 + I_d * W_2 = 0, \quad (6.3)$$

де $i_1 * W_1$, $i_{зм} * W_2$, та $I_d * W_2$ – намагнічувальні сили, що створюються первинною обмоткою з числом витків W_1 при протіканні по ній струму i_1 та вторинною обмоткою з числом витків W_2 при протіканні по ній змінної $i_{зм}$ (2.110) та постійної складових частин струму I (6.1).

Намагнічувальна сила $F_d = I_d * W_2$ залишається некомпенсованою і тому створює в осерді трансформатора постійний магнітний потік Φ_d , який називається *потоким вимушеного намагнічування*. Цей потік викликає додаткове магнітне насичення магнітопроводу. Щоб внаслідок цього магнітопровід не перенасичувався, необхідно збільшити площу перерізу його стрижнів та ярів. Це приводить до збільшення маси сталі і обмоткового матеріалу, тобто веде до підвищення габаритів, маси та вартості трансформатора. Такий же недолік буде мати і трифазна однонапівперіодна схема випрямлення при сполученні обмоток трансформатора в Y/Y_n (рис. 2.49, б). Але в трифазному трансформаторі потік вимушеного підмагнічування Φ_d буде значно меншим, ніж у однофазного трансформатора, тому що діючи одночасно у всіх трьох фазах, він замикається, як і потоки гармонік кратних трьом (див. 2.3.3), поза магнітною системою – через масло (повітря) та стінки бака.

Однофазна однонапівперіодна схема застосовується тільки для малопотужних випрямлячів, що пояснюється не лише недоліком, пов'язаним з наявністю потоку Φ_d , а і значними пульсаціями випрямленого струму. Використання трифазної однонапівперіодної схеми зі сполученням обмоток у Y/Y_n також обмежується випрямлячами незначної потужності. Якщо ж вторинну обмотку з'єднати за схемою Z_n (рис. 2.24, в), то недоліки однонапівперіодної схеми випрямлення, зумовлені виникненням потоку Φ_d , зникають. Це пояснюється тим, що при сполученні у рівноплечовий зигзаг (Z_n) на кожному стрижні виявляються дві половини вторинної обмотки зі зустрічним напрямом струму, кожна з яких створює свій потік $\Phi_d/2$. Таким чином, в кожному стрижні магнітної системи виникає два направлені назустріч один одному потоки $\Phi_d/2$, які урівноважуються. Ця перевага схеми сполучення в зигзаг дозволяє застосовувати однонапівперіодну схему випрямлення при будь-яких струмах та при значних напругах.

У двонапівперіодних схемах, коли струм вторинного кола трансформатора створюється на протязі обох півперіодів, умови роботи трансформатора набагато кращі, тому що невірні напружені намагаються сил в цьому випадку не виникає.

Друга обставина, що негативно впливає на роботу трансформатора в схемах випрямлення струму, є несинусоїдальна форма струмів у обмотках. В результаті цього в обмотках виникають струми вищих гармонік, що погіршують експлуатаційні показники трансформатора, а саме знижують його ККД.

Несинусоїдальність струмів первинної обмотки призводить до того, що розрахункові потужності первинної та вторинної обмотки виявляються різними ($S_{1ном} \neq S_{2ном}$). Тому для оцінки потужності трансформатора, що працює у схемі випрямлення, вводиться поняття *типової потужності* S_m , Вт:

$$S_m = (S_{1ном} + S_{2ном})/2 = (I_{1ном} \cdot U_{1ном} + I_{2ном} \cdot U_{2ном})/2 \quad (6.4)$$

і коефіцієнта типової потужності k_m

$$k_m = S_m / P_{d ном}, \quad (6.5)$$

де $P_{d ном} = U_{d ном} \cdot I_{d ном}$ – вихідна потужність, тобто потужність, що надходить до споживача постійного струму в номінальному режимі (при номінальній випрямленій напрузі $U_{d ном}$ та струмі $I_{d ном}$).

Типова потужність трансформатора завжди більша ніж його вихідна потужність, тобто $k_m > 1$, це пояснюється тим, що при будь-якій схемі випрямлення вторинні напруги та струми завжди більші за випрямлені ($U_2 > U_d$ і $I_2 > I_d$).

Із цього витікає, що габарити і маса трансформаторів для випрямлячів завжди більші, ніж у трансформаторів такої ж вихідної потужності, але при синусоїдальних струмах в обмотках. Це пояснюється тим, що у трансформаторів, які працюють на випрямлячі корисна потужність визначається лише постійною складовою струму вторинної обмотки I_d , а нагрівання – повним вторинним I_2 та первинним I_1 струмами, які, до того ж, будуть мати в своїх кривих вищі гармоніки.

При виборі трансформатора для випрямляча крім коефіцієнта типової потужності k_m необхідно також враховувати, що вторинна напруга завжди буде відрізнятись від випрямленої напруги:

$$U_{2ном} = k_U \cdot U_{d ном}, \quad (6.6)$$

де k_U – коефіцієнт напруги.

Значення коефіцієнтів k_U та типової потужності k_m для найбільш поширених схем випрямлення наведені нижче.

Схема випрямлення	k_U	k_m
Однофазна однонапівперіодна	2,22	3,09
Однофазна двонапівперіодна мостова	1,11	1,23
Однофазна двонапівперіодна з нульовим виводом	1,11	1,48
Трифазна з нульовим виводом	0,855	1,345
Трифазна мостова	0,427	1,05

Порівняння різних схем випрямлення показує, що найкраще використання трансформатора забезпечується у мостових схемах випрямлення, для яких k_m має мінімальні значення.

6.4. ТРАНСФОРМАТОРИ АВТОМАТИКИ

Такі трансформатори найчастіше виконуються як імпульсні трансформатори, пік-трансформатори, перетворювачі частоти та інші.

Імпульсні трансформатори. Використовуються у пристроях імпульсної техніки для зміни амплітуди імпульсів, виключення постійної складової, розмноження імпульсів тощо. Основною вимогою до таких трансформаторів – мінімальне спотворення форми трансформованих імпульсів.

Щоб виявити можливість трансформування короткочасних однополярних імпульсів розглянемо трансформатор без втрат і паразитних ємностей, що працює без навантаження. Уявимо,

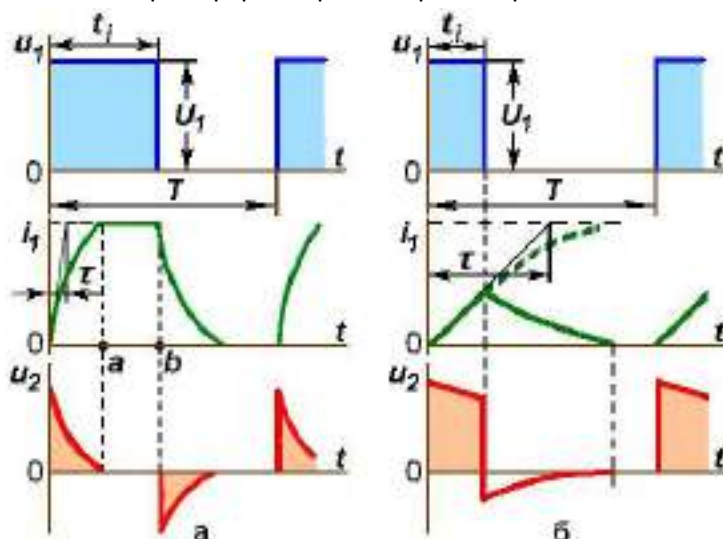


Рисунок 2.50 – Графіки напруг та струмів у імпульсному трансформаторі при $\tau \ll t_i$ (а) та при $\tau \gg t_i$ (б)

що на вхід цього трансформатора надходять однополярні прямокутної форми імпульси протяжністю t_i з періодом T (рис. 2.50). Первинна обмотка трансформатора має деяку сталу часу τ , зумовлену її індуктивністю L_1 та активним опором R_1 :

$$\tau = L_1/R_1. \quad (6.7)$$

Уявимо, що стала часу набагато менша тривалості імпульсу $\tau \ll t_i$ (рис. 2.50, а), при цьому графік первинного струму $i_1 = f(t)$ матиме вигляд кривої, що відрізняється від прямокутника. Крива ж вторинної напруги $u_2 = f(t)$ виявиться досить спотвореною. На відрізку часу ab напруга $U_2 = 0$, тому що

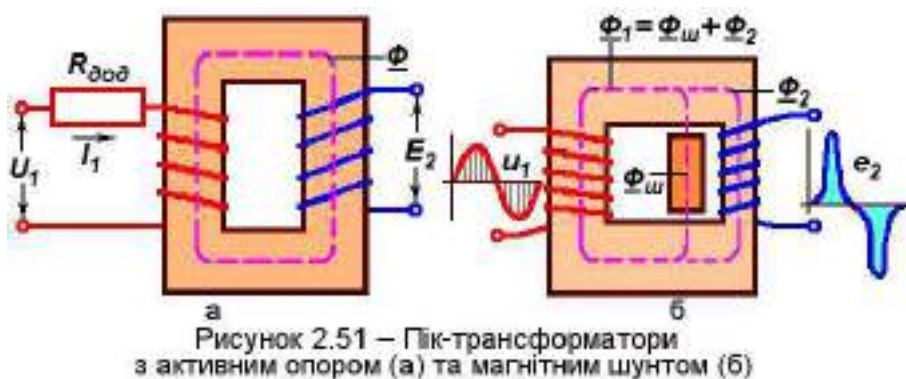
при $i_1 = \text{const}$, ЕРС $e_2 = M \cdot di/dt = 0$ (де M – взаєміндуктивність між обмотками). Таким чином трансформування імпульсів за умови $\tau \ll t_i$ виявляється неможливим.

Розглянемо випадок, коли $\tau \gg t_i$, що є більш реальним, тому що протяжність імпульсів звичайно не перевищує 10^{-4} с. У цьому випадку, коли імпульс u_1 припиняється ще до закінчення перехідного процесу в первинному колі, імпульси на виході трансформатора не мають суттєвих спотворень (рис. 2.50, б). При цьому від'ємна частина імпульсу легко усувається ввімкненням у вторинне коло трансформатора діода.

При більш детальному вивченні роботи імпульсного трансформатора необхідно враховувати вплив низки явищ: гістерезис, вихрові струми, паразитні ємнісні зв'язки між обмотками та окремими витками, індуктивність розсіювання обмоток тощо.

Щоб врахувати небажані наслідки впливу перерахованих явищ магнітопроводи імпульсних трансформаторів виготовляються із матеріалів з незначними залишковим намагнічуванням та коерцитивною силою, наприклад із холоднокатаної сталі, залізо-нікелевих сплавів, іноді із фериту. Щоб знизити вплив паразитних ємнісних зв'язків та індуктивності розсіювання обмоток, вони виконуються з незначною кількістю витків, при цьому збільшення густини струму не викликає в них недопустимого перегрівання завдяки малій протяжності імпульсів.

Пік-трансформатори. Призначені для перетворення напруги синусоїдальної форми в імпульси пікоподібної форми. Такі імпульси напруги необхідні в колах керування тиристорів, тиратронів тощо. Принцип дії пік-трансформатора ґрунтується на явищі магнітного насичення феромагнітного матеріалу.



У пік-трансформатора з активним опором первинна обмотка вмикається до мережі синусоїдальної напруги U_1 через досить значний додатковий опір $R_{до\delta}$ (рис. 2.51, а). При цьому магнітна індукція

вибирається такою, щоб система була в стані сильного магнітного насичення, але намагнічувальний струм завдяки великому активному опору $R_{до\delta}$ буде мати синусоїдальну форму, що викликає приплюснуту форму магнітного потоку Φ (рис. 2.29) і, як наслідок, пікоподібну ЕРС. Максимального значення ЕРС досягає, відстаючи від потоку на кут в 90° коли струм і потік мають нульове значення, а отже максимальну швидкість зміни (див. 2.2.1).

У пік-трансформатора з магнітним шунтом вторинна обмотка розташовується на стрижні зі зменшеним перерізом (рис. 2.51, а), який відповідно перебуває у перенасиченому стані, що викликає приплюснуту форму потоку Φ_2 . Решта ділянок магнітопроводу, маючи значно більший переріз, ненасичені і тому магнітний потік $\Phi_1 = \Phi_{ш} + \Phi_2$ буде синусоїдальним. Приплюснута форма кривої

$\Phi_2 = f(t)$ забезпечує пікоподібну вторинну ЕРС e_2 .

Магнітопроводи пік-трансформаторів найчастіше виготовляються із залізо-нікелевих сплавів.

Перетворювачі частоти. Досить поширені в системах автоматики трансформатори, що дозволяють подвоїти або потроїти частоту змінного струму.

Як приклад розглянемо трансформатор, за допомогою якого можна збільшити частоту в три рази – такий трансформатор називається *потроювачем частоти* (рис. 2.52). Він складається із трьох

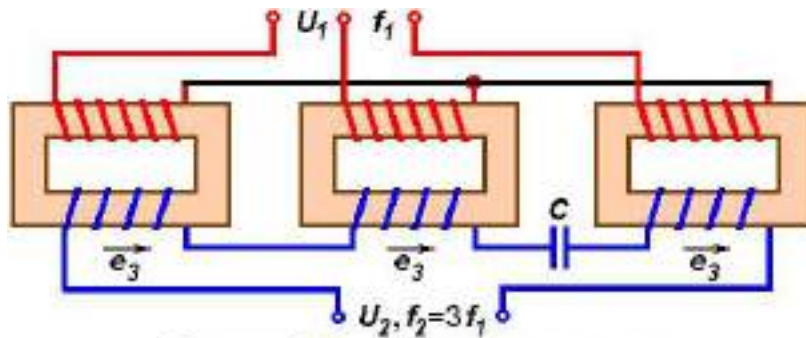


Рисунок 2.52 – Потроювач частоти

однофазних трансформаторів, що працюють із сильно насиченими магнітними системами. Їх первинні обмотки сполучені в зірку, а вторинні – послідовно.

Через відсутність нульового проводу (див. 2.3.3) намагнічувальні струми фаз (первинних обмоток трансформаторів) не мають третіх гармонік, які через це будуть

присутні в магнітних потоках та ЕРС вторинних обмоток. Враховуючи роз'єднаність магнітопроводів, ЕРС третіх гармонік e_3 , як і відповідні потоки, будуть мати досить високі значення, а так як вони співпадають по фазі, то на виході потроювача частоти встановлюється напруга U_2 , що дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС e_3 . Що стосується ЕРС першої гармоніки, то вони створюючись у вторинних обмотках кожного із трансформаторів, відсутні на виході, тому що при зсуві між собою на кут у 120° , їх алгебраїчна сума дорівнює нулю.

Для зниження падіння вторинної напруги при навантаженні послідовно з обмотками вмикається конденсатор C , ємність якого компенсує індуктивність обмоток.

Збільшувати частоту у більше число разів можна збільшуючи кількість перетворювачів частоти, вмикаючи їх один за одним (застосовуючи так зване каскадне ввімкнення), але такий спосіб пов'язаний зі значними затратами активних матеріалів і на практиці не застосовується.

7. ТЕМА ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Обмоткою якоря машин постійного струму називається замкнена система провідників, відповідним чином укладена в пази осердя ротора і електрично сполучена з колектором.

7.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВЕЛИЧИНИ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Елемент обмотки – *секція* [рамка в макеті (рис. 1.1)]. Секція може мати один *виток*, така секція зветься *одновитковою* (рис. 1.10); два витки – *двовиткова*, і більше двох витків – *багатовиткова*. Виток секції обмотки якоря машин постійного струму складається з *активних провідників* і *лобових частин*.

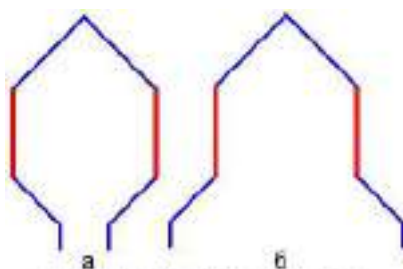


Рисунок 1.9 – Петляста (а) і хвиляста (б) секції обмотки якоря

Активні провідники – це ті частини витка, що розташовані в пазах (тому вони ще називаються *пазовими сторонами*), саме в них створюється ЕРС. Лобові частини призначені для з'єднання активних провідників і лежать за межами пазів, тому ЕРС в них не наводиться. Обмотка, з метою економії обмоткового матеріалу, виконується так, щоб довжина лобових частин була якомога меншою.

За формою лобових частин обмотки поділяються на *петлясті* та *хвилясті* (рис. 1.9). Щоб ЕРС, яка наводиться в обмотці,

була якнайбільшою, активні провідники [на (рис. 1.9) виділені жирними червоними лініями] повинні розташовуватись по осі різнойменних полюсів. Розрізняються дві осі магнітної системи машини: *поздовжня вісь* (проходить по осі полюсів і позначається літерою *d*) та перпендикулярна їй *поперечна вісь* – *q*. Відстань між осями полюсів називається *полюсною поділкою* τ .

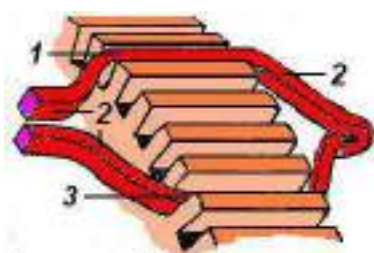


Рисунок 1.10 – Одновиткова секція петлястої обмотки

$$\tau = \pi D_a / 2p, \quad (7.1)$$

де D_a – діаметр якоря машини, м.

Лобові частини обмотки не повинні лежати в одній площині (це суттєво ускладнювало б виконання обмотки), тому в пазу активні сторони секцій (*число секцій* в машині – S) розташовуються в два шари, і обмотка називається *двошаровою*. На (рис. 1.10): 1 – активний провідник верхнього, а 3 – нижнього шару; 2 – лобові частини. *Число пазів* у машині – Z , щоб забезпечити ефективну роботу обмотки, число пазів і число секцій обмотки повинні бути однаковими, але конструктивно зробити це складно, тому в одному реальному пазах, як правило, виконується кілька (2, 3, 4...) *елементарних пазів*. Елементарний паз складається із двох активних сторін різних секцій. Число елементарних пазів $Z_e = S$. На (рис. 1.11) зображений реальний паз з двома елементарними: 1 – дерев'яний клин; 2 – активний провідник; 3 – пазова ізоляція.

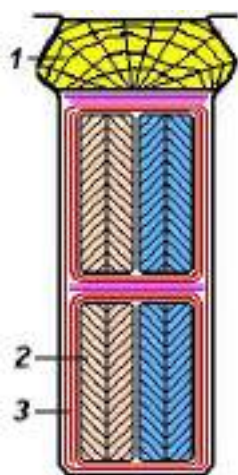


Рисунок 1.11 – Реальний паз якоря $Z = 2 Z_e$

Загальне *число активних провідників* N в машині пропорційне числу секцій:

$$N = 2S \cdot W_s, \quad (7.2)$$

де W_s – число витків у секції (в кожному витку 2 провідника).

Відстань між активними провідниками секції називається *першим кроком обмотки*, y_1 . Ця відстань вимірюється в елементарних пазах (полюсна поділка τ також досить часто вимірюється в пазах $\tau = Z_e / 2p$) і вона, на відміну від полюсної поділки, обов'язково повинна бути цілим числом (ц. ч.):

$$y_1 = Z_e / 2p \pm \varepsilon [\text{ц. ч.}], \quad (7.3)$$

де ε – деяка величина менше одиниці, яку необхідно відняти (додати), щоб отримати ціле число. Крім першого кроку, обмотка має ще *повний крок* або *крок по колектору* (y_k) (його величина для петлястих і хвилястих обмоток обчислюються по-різному) та *другий крок* y_2 :

$$y_2 = y - y_1. \quad (7.4)$$

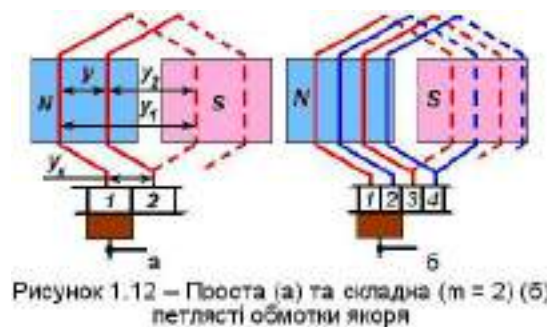
Між собою секції з'єднуються шляхом паяння на півниках колекторних пластин. Кінець попередньої і початок наступної секції з'єднуються на одній колекторній пластині. Таким чином, число колекторних пластин K рівне числу секцій та числу елементарних пазів ($K = S = Z_e$). Обмотка якоря замкнена (кінець останньої секції з'єднаний з початком першої), тому при двох щітках (у машині число щіток, як правило, виконується рівним числу полюсів) струм буде протікати

двома *паралельними вітками*. Число паралельних віток обмотки – $2a$ (тоді a – число *пар паралельних віток*) залежить від типу обмотки.

При проектуванні обмотки виконуються так звані розгорнуті схеми, на яких всі секції для спрощення зображуються одновитковими. Верхні пазові сторони **1** кожної секції зображуються суцільними, а нижні **3** (рис. 1.10) – пунктирними лініями. Ширина колекторної пластини на розгорнутій схемі дорівнює, як правило, відстані між першими активними сторонами сусідніх секцій. Щітки зображуються у вигляді затемнених прямокутників, їх ширина залежить від виду обмотки (рис. 1.12).

7.2. ПЕТЛЯСТІ ОБМОТКИ

Петлясті обмотки поділяються на прості та складні. В простій петлястій обмотці початок і кінець секції з'єднані з колекторними пластинами, що розташовані поруч, отже, повний крок по колектору обмотки $y (y_k) = \pm 1$ (рис. 1.12, а). Обмотка з $y (y_k) = 1$ називається *правоходовою*, кінець секції розташовується праворуч від початку [при $y (y_k) = -1$ – *лівоходовою* і не знаходить на практиці застосування через перехрещення і відповідно подовження лобових частин].



В петлястій обмотці дві послідовно сполучені секції лежать під однією парою полюсів (рис. 1.12), а кожна пара полюсів створює дві паралельні вітки. Таким чином число паралельних віток і число полюсів в петлястій обмотці однакове, тобто, $2a = 2p$.

Напруга на затискачах якоря визначається ЕРС однієї вітки, а струм машини дорівнює сумі струмів віток, тобто чим більше число паралельних віток, тим напруга менше (менше секцій у вітці), і тим більший струм якоря

I_a :

$$I_a = 2a \cdot i_a, \quad (7.5)$$

де i_a – струм паралельної вітки.

Якщо необхідно отримати досить значний струм, у низьковольтних машинах застосовується *складна петляста обмотка* (рис. 1.12, б). Така обмотка уявляє собою m (як правило, $m = 2$) простих петлястих обмоток, укладених на одному якорю і з'єднаних з одним колектором. Число паралельних віток в складній обмотці зростає пропорційно числу простих обмоток, тобто $2a = 2p \cdot m$. Ширина щітки при складній обмотці виконується такою, щоб кожна щітка перекривала m колекторних пластин, тобто стільки, скільки простих обмоток в складній, вмикаючи при цьому прості обмотки між собою паралельно. Повний крок обмотки (крок по колектору), визначається як $y (y_k) = m$.

ЕРС якоря E_a також залежить від числа паралельних віток $2a$, так як пропорційна числу секцій, що послідовно увімкнені в паралельну вітку:

$$E_a = E_s \cdot S / 2a, \quad (7.6)$$

де E_s – ЕРС, що створюється в одній секції.

На (рис.1.13, а) зображена розгорнута схема простої петлястої обмотки з $Z_e = 14$; $2p = 4$; $y_1 = 14/4 = 3\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 3$; ($\varepsilon = -\frac{1}{2}$); $y_2 = 1 - 3 = -2$; крок щіток $y_{щ}$ дорівнює полюсній поділці $\tau = 3\frac{1}{2}$; q –

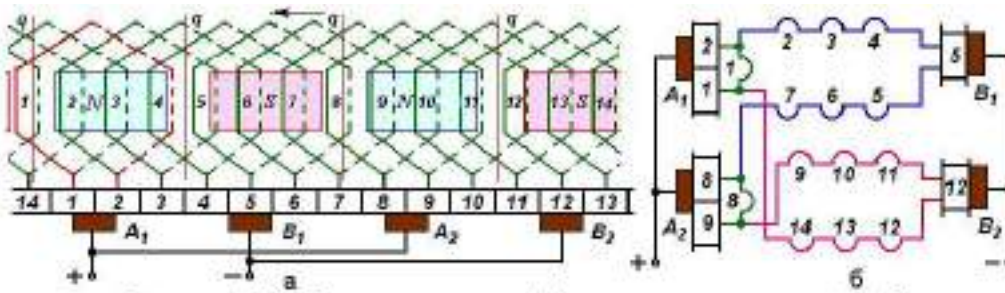


Рисунок 1.13 – Розгорнута схема (а) схема паралельних віток (б) простої петлястої обмотки

поперечні осі машини. Стрілкою показаний напрям обертання обмотки і колектора. Положення щіток на колекторі вибирається таким, щоб провідники, які з ними з'єднуються

через колекторні пластини, розташовувались між полюсами по осі q (ця вісь називається також *геометричною нейтраллю*). При визначенні полярності щіток можна вважати, що машина працює в режимі генератора. Згідно з правилом правої руки, визначається напрям ЕРС (струму), що створюється в активних провідниках секцій, так як полюси нависають над провідниками, то в них під полюсом N ЕРС направлена донизу, а під полюсом S – догори. Отже щітки A_1 та A_2 , від яких струм витікає у зовнішнє коло – позитивні (“+”), а B_1 та B_2 – негативні (“-”). Якщо припустити що машина працює в режимі двигуна, то полярність щіток не зміниться, адже ЕРС у двигуна направлена назустріч струмові, а струм надходить у двигун від затискача “+”.

Схема паралельних вітки цієї обмотки ($2a = 4$) подана на (рис. 1.13, б). Даної митті секції 1 та 8 замкнені щітками, секції 2; 3; 4 та 5; 6; 7 створюють пару паралельних віток першої пари полюсів, а секції 9; 10; 11 та 12; 13; 14 – другої. В кожній вітці пари паралельних віток ввімкнена однакова кількість секцій (по три), тобто в магнітному полі вони розташовані так, що ЕРС кожної вітки даної митті однакова і зрівняльні струми між ними не виникають.

7.3. ХВИЛЯСТІ ОБМОТКИ

Хвилясті, як і петлясті, обмотки якоря поділяються на прості та складні. Просту хвилясту обмотку можна отримати при послідовному з'єднанні двох секцій, що лежать під різними парами полюсів. Початок і кінець секції такої обмотки приєднуються до колекторних пластин віддалених одна від одної на відстань кроку по колектору $y_k = y$. За обхід якоря укладається стільки секцій, скільки пар полюсів має машина.

Кінець останньої, за обходом якоря, секції приєднується до колекторної пластини, що розташована поруч зліва тієї, з якої розпочинався обхід. В цьому випадку обмотка називається *лівоходовою*. Якщо обхід починався з першої колекторної “1” пластини, то закінчиться на останній “К” (рис. 1.14), а новий почнеться саме з неї і закінчиться на передостанній “К – 1”.

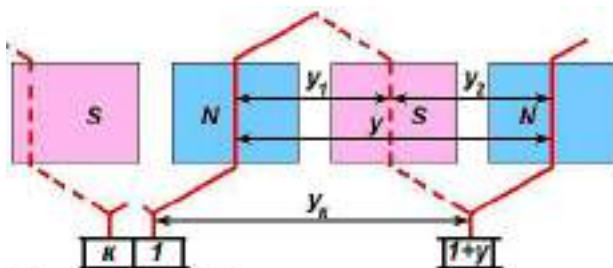


Рисунок 1.14 – Проста хвиляста обмотка якоря

Теоретично можливо, щоб обхід якоря закінчувався на пластині праворуч, тоді обмотка буде називатися *правоходовою*, але практичного застосування така обмотка не знайшла через

додаткові витрати обмоткового матеріалу за рахунок перехрещення лобових частин (що має місце і в лівоходовій петлястій обмотці).

Як і у петлястої обмотки, секції хвилястої можуть бути одно-, дво- і багатовитковими. Повний крок простої хвилястої обмотки або крок по колектору зворотно пропорційний числу пар полюсів p :

$$y(y_k) = (K \pm 1)/p, \quad (7.7)$$

де знак “мінус” відповідає лівоходовій, а “плюс” правоходовій обмотці.

Дві сполучені послідовно секції хвилястої обмотки розташовуються під різними парами полюсів, а тому число паралельних віток в такій обмотці залежить від числа полюсів, тобто $2a = 2$. Враховуючи значну кількість секцій в одній паралельній вітці (число самих віток у p разів менше, ніж в аналогічній за числом секцій петлястій обмотці), хвиляста обмотка використовується у високовольтичних машинах при незначних струмах. В такій обмотці можна було б обмежитись всього двома щітками при будь-якому числі пар полюсів, але число щіток виконується рівним числу полюсів, щоб кількість з'єднаних секцій в обох вітках була однаковою. Крім цього, повний комплект щіток дозволяє знизити струм, що протікає через одну щітку, а отже, і зменшити розміри колектора.

Складна хвиляста обмотка (рис. 1.15) складається з кількох m (часто $m = 2$) простих обмоток, що з'єднані паралельно шириною щітки. Крок по колектору (повний крок) при цьому буде залежати від числа простих обмоток m :

$$y(y_k) = (K \pm m)/p, \quad (7.8)$$

де знак “мінус” відповідає лівоходовій обмотці, а “плюс” – правоходовій, як і в простій хвилястій обмотці.

На (рис. 1.15) зображена розгорнута схема складної хвилястої обмотки при $m = 2$; $Z_e = 26$; $2p = 4$; $y = (26 - 2)/2 = 12$; $y_1 = 26/4 = 6\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 6$; ($\varepsilon = -\frac{1}{2}$); $y_2 = 12 - 6 = 6$; крок щіток $y_{щ} = 6\frac{1}{2}$. Стрілкою показаний напрям обертання обмотки і колектора. Полярність щіток визначена аналогічно (рис. 1.13). На схемі також показані два *вирівнювачі другого роду*, про які мова піде в наступній лекції.

Якщо число пар полюсів p і число секцій S – числа парні, то повний крок простої хвилястої обмотки згідно з (1.8) виявиться дробовим числом і таку обмотку виконати буде неможливо.

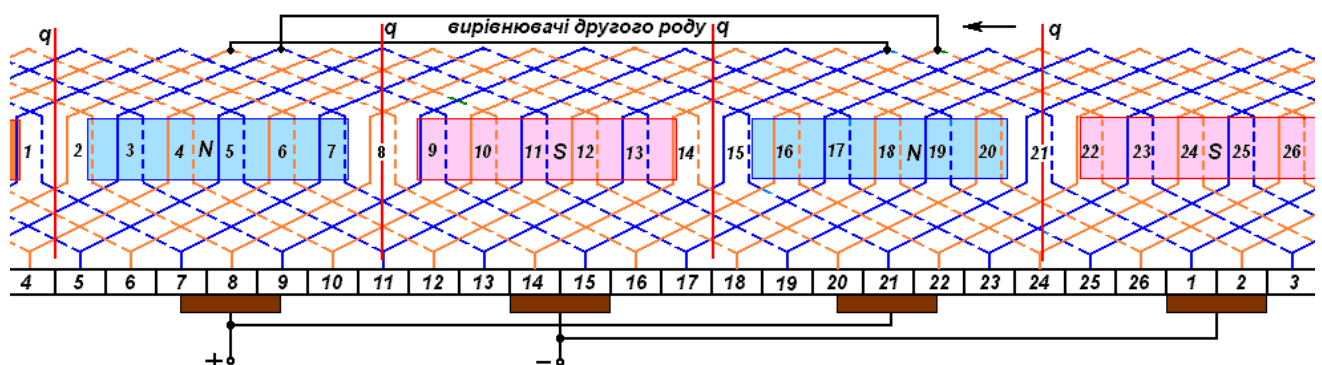


Рисунок 1.15 – Розгорнута схема складної хвилястої обмотки якоря машини постійного струму

Проте,

якщо є необхідність використати якорі з наявним числом пазів, то можна застосувати так звану обмотку з *мертвою секцією*. В такій обмотці одна із секцій (як правило, остання) не припаається до колектора і вкладається тільки для механічної симетрії ротора.

8. ТЕМА МАГНІТНЕ ПОЛЕ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Однією із умов роботи електричної машини є наявність магнітного поля, що звичайно має кілька складових. Основне поле (основний потік) в машині постійного струму створюється індуктором, розміщеним на статорі. По обмотці ротора (якоря), при роботі під навантаженням, протікає струм якоря, що створює своє магнітне поле – поле якоря.

Питання, пов'язані із взаємодією цих полів та їх розрахунками, розглядаються в даній темі.

8.1. МАГНІТНЕ КОЛО МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

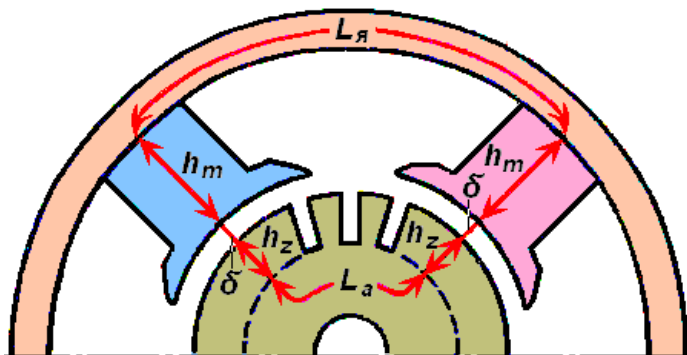


Рисунок 1.19 – Розрахункова ділянка магнітного кола чотириполюсної машини постійного струму

компенсаційна обмотка, в цьому випадку додається шоста ділянка – зубцева зона полюса);

– повітряний проміжок (зазор) (δ), хоча і має мінімальну довжину, але опір потоку найбільший саме на цій ділянці (ділянка, де відсутнє насичення);

– зубцева зона якоря (h_z) виділена окремою ділянкою, враховуючи незначний переріз (через наявність пазів) яким замикається магнітний потік (найбільш насичена ділянка магнітного кола);

– спинка якоря (L_a), набрана з пластин електротехнічної сталі товщиною (0,35 – 0,5) мм (пластини для зниження втрат на вихрові струми ізольовані між собою спеціальним покриттям);

– ярмо ($L_{\text{я}}$) – відливається із чавуну або відрізається із товстостінної труби.

Будь-яка електрична машина має два кола: електричне та магнітне, в машині постійного струму останнє складається із п'яти (в деяких машинах із шести) ділянок (рис. 1.19):

– головний полюс (h_m), виконується із пластин легованої холоднокатаної конструкційної сталі товщиною (1 – 1,5) мм (в пазах полюсних наконечників головних полюсів машин середньої та великої потужності може розташовуватись

Проведення розрахунку магнітного кола машини, дає можливість визначити параметри обмотки збудження, магніторушійна сила (МРС) якої визначається за законом повного струму як сума МРС (магнітних напруг) на кожній ділянці кола:

$$F_{\text{о.з.}} = 2F_{\delta} + 2F_z + 2F_m + F_a + F_{\text{я}}, \quad (8.1)$$

де $F_{\delta}, F_z, F_m, F_a, F_{\text{я}}$ – магнітні напруги повітряного проміжку, зубцевої зони, головного полюса, спинки якоря та ярма відповідно (коефіцієнти 2 при МРС повітряного проміжку, зубцевої зони та головного полюса вказують на те, що таких ділянок у колі по дві).

Слід зазначити, що коли машина має компенсаційну обмотку, в (1.29) вносяться ще й дві МРС зубцевої зони основного полюса.

Розрахунок розпочинається з визначення магнітного потоку кола $\Phi_{ном}$ за відомими значеннями ЕРС обмотки якоря E_a , частоти обертання ω та електромашинної сталої k машини з (1.20):

$$\Phi_{ном} = E_a / (k \cdot \omega). \quad (8.2)$$

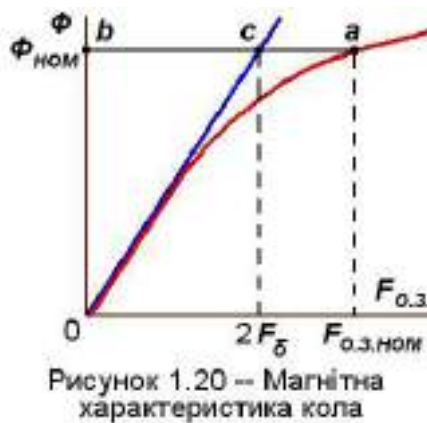
Враховуючи, що магнітний потік незмінний на всіх ділянках кола (за винятком потоку полюса, який вищий від значення $\Phi_{ном}$ на величину потоку розсіювання, що враховується коефіцієнтом розсіювання $\sigma_m \approx 1,1 - 1,25$), визначається індукція кожної ділянки:

$$B_i = \Phi_{ном} / S_i, \quad (8.3)$$

де B_i та S_i — індукція та площа перерізу i -тої ділянки (геометричні розміри машини вважаються відомими).

За таблицями чи кривими намагнічування для феромагнітного матеріалу відповідної ділянки визначається напруженість поля $H_i = f(B_i)$, а потім магнітна напруга на i -тій ділянці F_i :

$$F_i = H_i \cdot l_i, \quad (8.4)$$



де l_i — довжина i -тої ділянки.

Задаючи кілька значень магнітного потоку (наприклад: $0,5\Phi_{ном}$, $0,75\Phi_{ном}$, $\Phi_{ном}$, $1,25\Phi_{ном}$), проводиться розрахунок кола для кожного значення потоку і будується магнітна характеристика машини (рис. 1.20). Пряма 0c характеризує прямолінійну зміну магнітного потоку в повітряному проміжку, а крива намагнічування 0a — зміну потоку в машині до насичення магнітної системи. Відношення відрізків $\underline{ab}$ та $\underline{bc}$ називається коефіцієнтом насичення магнітного кола машини k_μ :

$$k_\mu = \underline{ab} / \underline{bc} = F_{0.3, ном} / (2F_\delta) \quad (8.5)$$

де $F_{0.3, ном}$ — номінальна магніторушійна сила, що створюється обмоткою збудження, А.

Звичайно для машин постійного струму коефіцієнт $k_\mu \approx 1,15 - 1,35$. Якщо $k_\mu < 1,15$, то в машині буде перевитрата феромагнітного матеріалу (машина працює у ненасиченому режимі), якщо

$k_\mu > 1,35$ – перевитрата міді (магнітна система перенасичена). В обох випадках необхідно провести новий розрахунок, змінивши значення вихідної величини (1.30) в той, чи інший бік.

Після визначення МРС обмотки збудження, розраховується число витків w_z цієї обмотки за попередньо заданим значенням величини *струму збудження* I_z в залежності від способу збудження машини:

$$w_z = F_{o.z} / I_z. \quad (8.6)$$

Розраховане за (1.34) значення числа витків округляється до цілого.

8.2. РЕАКЦІЯ ЯКОРЯ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

При роботі машини постійного струму в її магнітній системі обмоткою збудження створюється основний магнітний потік Φ . Якщо машина працює в режимі *неробочого ходу* (НХ), то цей потік буде направлений симетрично повздовжній осі машини (d). На (рис. 1.21, а) магнітний потік НХ, щоб не ускладнювати рисунок, зображено всього чотирма магнітними силовими лініями.

При роботі машини під навантаженням, струм протікаючи по обмотці якоря, створює своє поле – *поле якоря*, напрям якого визначається *правилом буравчика*. На (рис. 1.21, б) це поле показано однією магнітною силовою лінією навколо провідника, що замінює в даному випадку всю обмотку якоря.

Його напрям по осі q машини справа наліво, тобто справа струмом якоря створюється північний полюс N , а зліва – південний S .

Дія поля якоря на основний магнітний потік машини називається реакцією якоря.

В результаті дії реакції якоря результатне магнітне поле викривляється і стає несиметричним відносно поздовжньої осі d , (рис. 1.21, в).

На (рис. 1.21) реакція якоря для випадку, коли щітки розташовані на геометричній нейтралі машини, пояснюється накладанням одного режиму на другий (так званим “методом суперпозиції”):

– (рис. 1.21, а) зображує основне поле при відсутності струму в якорі (режим НХ), а отже, і його поля;

– (рис. 1.21, б) показує, визначене за *правилом буравчика*, магнітне поле, що створює виток (обмотка) якоря при відсутності струму

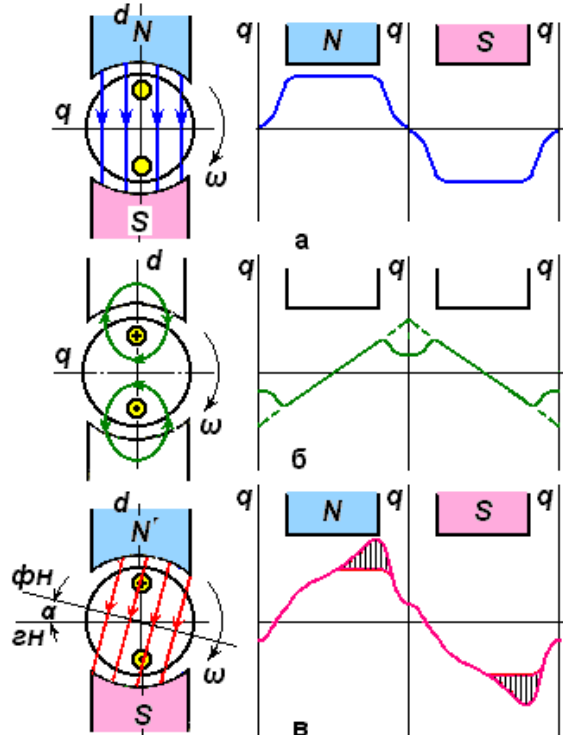


Рисунок 1.21 – Магнітне поле та розподіл індукції у повітряному проміжку машини при НХ (а), без збудження (б) і результуюче (в)

збудження (полюси присутні лише як феромагнітний матеріал по осі d). Напрямок струму витка такий, який створила б ЕРС, що наводиться в провідниках якоря (рис. 1.21, а) в режимі генератора при обертанні ротора за годинником. Розподіл індукції в повітряному проміжку (показаний пунктирною лінією) мав би місце тоді, коли б навколо циліндра якоря був циліндричної форми статор, як,

наприклад, в машині змінного струму. Реально індукція розподіляється по кривій (зображеній жирною лінією), що має “провали” між полюсами, викликані відсутністю між ними феромагнітного матеріалу;

– (рис. 1.21, в) – результатні поле та розподіл індукції в повітряному проміжку, тобто накладання (рис. 1.21, б) на (рис. 1.21, а). Зліва під полюсом N та справа під S поле ослабло (на одну силову лінію: назустріч двом лініям основного поля направлена одна лінія поля якоря) і, навпаки, справа під N і зліва під S підсилилось (на одну силову лінію: з двома лініям основного поля співпадає одна лінія поля якоря). Лінія, відносно до якої результатне поле перпендикулярне, називається **фізичною нейтраллю (фн)**. Вона в режимі НХ співпадає з геометричною нейтраллю (**гн**), а під дією реакції якоря зміщується з неї на кут α за напрямом обертання.

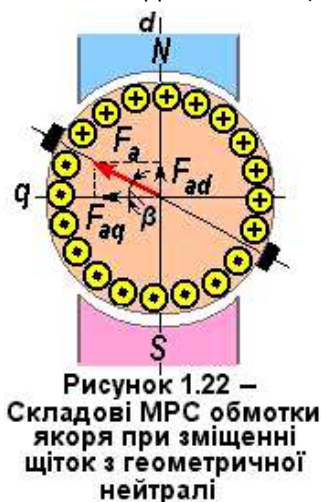
Слід також зазначити, що (рис. 1.21) демонструє реакцію якоря при роботі машини в режимі генератора. Але ці ж рисунки будуть відображати реакцію якоря двигуна, якщо змінити напрям обертання (в даному випадку обертати проти годинникової стрілки) ротора.

8.3. ВПЛИВ РЕАКЦІЇ ЯКОРЯ НА РОБОТУ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Зображені на (рис. 1.21) поле та індукція в повітряному проміжку машини постійного струму справедливі лише для машин з ненасиченою магнітною системою і без додаткових полюсів. В цьому випадку поле лише викривляється, а результатний потік не змінюється: на скільки зменшився потік під краєм полюса на який ротор набігає (в даному випадку на одну магнітну силову лінію) на стільки ж і збільшився під тим краєм полюса, з якого ротор збігає. Тобто, **в ненасиченій машині постійного струму реакція якоря в підсумку не впливає на величину потоку, а тільки викривляє його**.

Викривлення результатного поля негативно впливає на робочі властивості машини. Перш за все, зміщення фізичної нейтралі відносно геометричної веде до більш важких умов роботи щіткового контакту і може стати причиною підвищення рівня іскріння між колектором та щітками. По-друге, викривлення результатного поля призводить до перерозподілу магнітної індукції у повітряному проміжку, різко підвищуючи її під тими краями полюсів генератора, з яких ротор збігає. Це, в свою чергу, веде до підвищення миттєвих значень ЕРС секцій обмотки якоря в моменти попадання пазових сторін цих секцій в зони максимальних значень магнітної індукції. Як наслідок, зростає напруга між сусідніми колекторними пластинами, а при значному навантаженні таке зростання може перевищити допустимі межі, викликавши електричну дугу між пластинами. Графітовий пил, що утворюється внаслідок стирання щіток, буде сприяти розвитку електричної дуги, і може виникнути настільки потужна електрична дуга, що перекриє увесь колектор або його частину (в таких випадках вживається термін “круговий вогонь по колектору”).

Такі наслідки реакції якоря при ненасиченій машині. Якщо машина насичена, реакція якоря буде вести до зниження результатного магнітного поля, тому що один край полюса буде розмагнічуватись, а інший підмагнітитись, через насичення системи, не зможе. Це зниження індукції відповідає заштрихованим ділянкам на (рис. 1.21, в). Таким чином, **в насиченій машині реакція якоря приводить не тільки до викривлення основного поля, а й до його зниження**, що негативно позначається на роботі як генератора (знижується ЕРС), так і двигуна (зменшується електромагнітний момент).



При зміщенні щіток з геометричної нейтралі, негативні наслідки реакції якоря підсилюються. Пояснюється це тим, що разом зі щітками на кут β напрямку обертання зміщується і вектор МРС якоря (рис. 1.22). При цьому МРС F_a отримує крім поперечної складової F_{aq} ще й поздовжню F_{ad} , найчастіше направлену назустріч основному магнітному потоку,

суттєво ослаблюючи його; якщо зміщувати щітки назустріч обертанню генератора (за обертанню у двигуна), то $F_{ад}$ буде співпадати з основним полем, підсилюючи його, а це може стати причиною іскріння на колекторі, тобто і те і інше лише погіршує роботу машини.

Розмагнічувальна дія реакції якоря вимагає збільшення числа витків обмотки збудження. Розрахувати таке збільшення досить складно, а тому при проектуванні машини в (1.34) вводиться так званий коефіцієнт реакції якоря $k_{р.я} \approx 1,05 - 1,22$, межі якого отримані у результаті багаторічного досвіду проектування і експлуатації колекторних машин. Нижня межа $k_{р.я}$ відповідає магнітній індукції зубцевої зони $B_z = 1,7 \text{ Тл}$, а верхня – $B_z = 2,3 \text{ Тл}$.

Щоб позбавитись від шкідливого впливу реакції якоря на машину, або хоч би знизити цей вплив до допустимих меж, при проектуванні застосовується один з двох наведених нижче засобів.

Перший, найбільш ефективний засіб зниження впливу реакції якоря по поперечній осі – застосування компенсаційної обмотки. Така обмотка розташовується в пазах полюсних наконечників і вмикається послідовно з обмоткою якоря. Струм, що протікає в компенсаційній обмотці, створює МРС, яка направлена назустріч МРС реакції якоря і автоматично компенсує її при будь-яких навантаженнях, будучи рівною з нею по модулю. Таким чином, в машині з компенсаційною обмоткою при переході від НХ до режиму навантаження закон розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку головних полюсів залишається практично незмінним. В просторі між полюсами частина МРС якоря все ж залишається не скомпенсованою. Її небажаний вплив на роботу щіткового контакту усувається застосуванням додаткових полюсів. Застосування компенсаційної обмотки збільшує вартість машини, тому вона виконується лише в машинах потужністю (150 – 500) кВт при напрузі більше 440 В.

Другий – збільшення повітряного зазору між якорем та краями головних полюсів. Такий спосіб використовується у мікромашинах та машинах малої потужності. В цьому випадку машина буде насиченою лише по осі полюсів, де повітряний зазор мінімальний, а край кожного полюса ненасичений і допускає зростання потоку при реакції якоря. Цей спосіб значно знижує розмагнічувальну дію реакції якоря, але недоліком його є необхідність збільшувати намагнічувальну силу обмотки збудження.

На принципі зниження МРС поперечної реакції якоря за рахунок підвищеного магнітного опору на шляху її дії ґрунтується і інший спосіб ослаблення дії реакції якоря. Його суть полягає в тому, що пластини головних полюсів виготовляються із листової анізотропної холоднокатаної сталі (наприклад 3411), штампуються вони так, щоб вісь полюса співпадала з напрямом прокатування сталі. В цьому випадку магнітний потік на краях полюсів буде направлений поперек прокатування, а це буде створювати йому додатковий магнітний опір, унеможливаючи насичення країв полюсів.

8.4. СПОСОБИ ЗБУДЖЕННЯ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основне магнітне поле машини постійного струму може створюватись двома способами, а саме: постійним магнітом та обмоткою збудження. *Збудження за допомогою постійних магнітів* (рис. 1.23, а) – *магнітоелектричне збудження* використовується для машин незначної потужності (до 30 кВт). До переваг такого збудження слід віднести відсутність втрат на збудження, а отже підвищення ККД машини, зниження її габаритів тощо, а до недоліку – неможливість змінювати величину основного магнітного потоку. Найчастіше магнітоелектричне збудження використовується в двигунів. При цьому

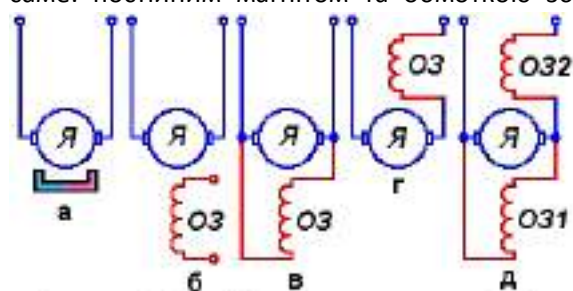


Рисунок 1.23 – Магнітоелектричний (а), незалежний (б), паралельний (в), послідовний (г) та змішаний (д) способи збудження машин постійного струму

незмінність магнітного поля при регулюванні частоти обертання можна компенсувати зміною напруги в колі якоря.

Створення магнітного поля машини обмоткою збудження називається *електромагнітним збудженням*. Суттєва перевага такого збудження – можливість його використання в машині будь-якої потужності. В залежності від способу ввімкнення обмотки збудження *ОЗ* в коло обмотки якоря *Я*, машини постійного струму поділяються на *машини незалежного збудження* (рис. 1.23, б) (до цих машин можна формально віднести і машини магнітоелектричного збудження) і машини, в яких обмотка збудження сполучена з обмоткою якоря: *машини паралельного збудження* (рис. 1.23, в), *машини послідовного збудження* (рис. 1.23, г) та *машини змішаного збудження* (рис. 1.23, д).

В машинах незалежного збудження обмотка збудження електрично не пов'язана з обмоткою якоря, а живиться від незалежного джерела постійного струму. Це, в деякій мірі, є недоліком такої машини, адже необхідно мати додаткове джерело енергії, потужність якого може сягати до 6 % від потужності машини.

Найбільш поширеними є машини, в яких обмотка збудження сполучена з обмоткою якоря. Струм обмоток збудження таких машин залежить від струму якоря і може сягати в паралельній якорю обмотці до 8 % в машинах малої потужності (до 10 кВт) і до 4 % (в машинах до 1000 кВт) від цього струму. В послідовній обмотці струм такий же, як і в обмотці якоря. При змішаному збудженні послідовна і паралельна обмотки в машинах малої потужності досить часто виконуються не рівнозначними: послідовна обмотка такої потужності, що її потік складає не більше 10 % від потоку паралельної обмотки. В цьому випадку вона лише компенсує розмагнічувальну дію реакції якоря, замінюючи тим самим компенсаційну обмотку, яка в таких машинах не виконується.

9. ТЕМА КОМУТАЦІЯ В МАШИНАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Наявність колектора в машині постійного струму ускладнює не лише конструкцію машини, але й процес її експлуатації. Пов'язано це з тим, що колектор і щітки виконують роль перетворювача струму із змінного в постійний (генератор) та, навпаки, із постійного в змінний (двигун). *Під час роботи машини секції обмотки якоря, з'єднані між собою послідовно в паралельні вітки, перемикаються щітками і колектором із однієї такої вітки в іншу. Процес цього перемикання і пов'язані з ним явища, що відбуваються між щітками і колектором та в секціях, які перемикаються, називаються комутацією в машинах постійного струму.*

9.1. ПРИЧИНИ, ЩО ВИКЛИКАЮТЬ ІСКРІННЯ МІЖ КОЛЕКТОРОМ ТА ЩІТКАМИ

При роботі колекторної машини щітка ковзає по колектору створюючи ковзний контакт, якість якого суттєво залежить від стану колектора та самої щітки. Площа контакту, що вибирається за значенням робочого струму, при недостатньому тиску щітки на колектор або порушенні геометрії колектора може при обертанні змінюватись. Це призводить до зміни густини струму в окремих місцях щітки і відповідно умови нормальної роботи ковзного контакту. Перемикання щітками секцій, що сполучаються з ними через колекторні пластини, з однієї паралельної вітки в іншу супроводжується зміною напрямку струму в секціях на протилежний та коротким замиканням секцій. Все це може викликати іскріння між щітками і колекторними пластинами. Величина та інтенсивність іскріння залежать від досить багатьох факторів і причин, основні з яких є:

- *механічні причини* – слабкий тиск щіток на колектор, еліптичність або не гладка поверхня колектора, забруднення його поверхні, виступ міканітової ізоляція над мідними пластинами, слабе закріплення траверси, пальців чи щіткотримачів, а також інші причини, які викликають *порушення електричного контакту між щіткою і колектором*;

- *потенціальні причини* іскріння виникають при перевищенні допустимого значення напруги між суміжними колекторними пластинами (див. 1.3.3), що найбільш небезпечно, так як може привести до виникнення електричної дуги і навіть *кругового вогню по колектору*;

- *комутаційні причини* іскріння створюються фізичними процесами, що відбуваються в машині при перемиканні секції із однієї паралельної вітки до іншої, вони мають ту ж природу, що і поява електричної дуги при розмиканні будь-якого кола змінного струму з індуктивністю.

Частіше всього іскріння зумовлене усіма цими факторами в комплексі. Найпростіше виявити і усунути механічні причини появи іскріння, найскладніше – комутаційні, природа і складові частини виникнення яких вивчені ще не достатньо.

На заводі, де виготовляється машина, в ній налаштовується *темна комутація*, що виключає будь-яке іскріння. Але в процесі роботи машини колектор і щітки зношуються, а це може привести до появи іскріння. Якщо іскріння незначне, то робота машини можлива, в паспорті машини заводом вказується допустимий ступінь іскріння. В цілому, іскріння під краєм щітки, що збігає, оцінюється п'ятьма ступенями іскріння (*класами комутації*).

Ступінь 1 – іскріння відсутнє (темна комутація).

Ступінь 1^¼ – *найменше іскріння під незначною частиною щітки, яке не викликає почорніння колектора і появи нагару на щітках.*

Ступінь $1\frac{1}{2}$ – слабе іскріння під значною частиною щітки, що викликає сліди почорніння на колекторі, яке легко стирається з поверхні колектора за допомогою бензину, чи іншого розчинника, а також сліди нагару на щітках.

Ступінь 2 – іскріння під всією щіткою. Робота машини допускається тільки при короткочасних поштовхах навантаження і при перевантаженні. Приводить до появи слідів почорніння на колекторі, яке не зникає після протирання колектора бензином, і до появи нагару на щітках.

Ступінь 3 – значне іскріння під всією щіткою з появою іскор, що вилітають із-під щітки. Таке іскріння приводить до значного почорніння, яке можна зняти лише за допомогою наждачної шкірки, а також до підгоряння і руйнування щіток. Допускається тільки під час прямого (безреостатного) пуску або реверсування, якщо при цьому колектор і щітки залишаються в стані, що дозволить подальшу роботу.

Якщо допустимий ступінь іскріння у паспорті машини заводом не вказується, то при номінальному навантаженні машини він не повинен перевищувати $1\frac{1}{2}$.

9.2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ, ЩО СТОСУЮТЬСЯ КОМУТАЦІЇ

В процесі комутації секції перемикаються із однієї паралельної вітки в іншу, з'єднуючись при цьому через свої колекторні пластини зі щітками.

Секція, кінці якої сполучені з колекторними пластинами, що замикаються щітками, називається *комутованою секцією*.

Час, за який відбувається комутація в секції і щітка повністю переходить з однієї колекторної пластини на іншу, називається *періодом комутації*, T_k .

Враховуючи незначну ширину колекторної пластини і досить значну частоту обертання, період комутації дуже малий і складає не більше тисячних долей секунди. Щоб його дещо підвищити доводиться збільшувати ширину щітки в порівнянні з шириною колекторної пластини.

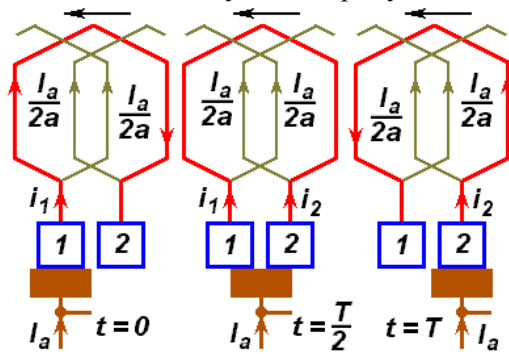


Рисунок 1.24 – Перехід секції з правої в ліву паралельну вітку при комутації

Складність процесів комутації не дозволяє розглядати її в загальному вигляді. Тому для отримання аналітичних і графічних залежностей, що пояснюють комутацію, приймається низка припущень. Вважається, що ширина щітки рівна ширині колекторної поділки; щітки розміщені на геометричній нейтралі; електричний опір комутованої секції і місць її приєднання до колектора, в порівнянні з опором перехідного контакту “щітка-колектор”, настільки малий, що ними можна знехтувати (найчастіше таке співвідношення відповідає дійсності). Початком комутації ($t=0$) довільної секції вважається мить, коли щітка дотикається тільки до тієї колекторної

пластини, що сполучена з першою пазовою стороною даної секції (рис. 1.24, а), а кінцем ($t=T_k$) – відповідно з другою (рис. 1.24, в).

Найкраще процес комутації розглянути на прикладі комутації секції простої петлястої обмотки. На початку комутації ($t=0$) ця секція, на (рис. 1.24, а) виділена більш жирною червоною лінією, увімкнена в праву паралельну вітку і струм в ній $I_a/2a$ протікає за годинником. Такий же струм ($I_a/2a$) і в секції, увімкнений в ліву паралельну вітку і приєднаний до першої колекторної пластини (зображена тонкою зеленою лінією), тобто струм першої колекторної пластини (рівний їх сумі) $i_1 = I_a/a$. Друга колекторна пластина ще не дотикається до щітки і струм в ній відсутній ($i_2 = 0$).

В процесі комутації щітка поступово збігає з пластини **1** і набігає на пластину **2**, в результаті чого струм i_1 знижується, а струм i_2 пропорційно зростає так, що їх сума залишається сталою ($i_1 + i_2 = I_a/a$). В середині комутації, коли щітка рівномірно перекриває обидві пластини ($t = T_k/2$) струм в секції зменшується до нуля за умови, що густина струму в процесі його зміни в контакті між щіткою і колекторними пластинами залишалась незмінною. За цієї умови $i_1 = i_2 = I_a/2a$.

По закінченні комутації ($t = T_k$) щітка повністю перейшла на колекторну пластину **2**, і, як наслідок, комутувана секція перемкнулась в ліву паралельну вітку, струм в ній знову став рівним $I_a/2a$, але напрям його змінився на протилежний (тепер він протікає проти годинника). Струм колекторної пластини **1** знизився до нуля ($i_1 = 0$), а пластини **2** зріс до $i_2 = I_a/a$.

Таким чином, в процесі комутації струм у комутуваній секції змінюється і за напрямом, і за величиною. Його ж величина, за абсолютним значенням, до початку комутації, і по її завершенні залишається незмінною і рівною $I_a/2a$.

9.3. ПРЯМОЛІНІЙНА КОМУТАЦІЯ

Розглядаючи процес комутації уявимо, що в комутуваній секції, замкненій щіткою, ЕРС не створюється, тоді згідно з другим правилом Кірхгофа можна записати:

$$i_1 \cdot R_1 - i_2 \cdot R_2 = 0, \quad (9.1)$$

де R_1, R_2 – перехідні опори між щіткою та пластиною **1**, яка зі щітки збігає, та між щіткою і пластиною **2**, що на неї набігає.

Як відзначалось у попередньому параграфі струм i у комутуваній секції змінюється так, що справедливі співвідношення:

$$i_1 = I_a/2a - i; \quad i_2 = I_a/2a + i. \quad (9.2)$$

Підставивши (1.36) в (1.35), отримаємо:



$$(I_a/2a - i) \cdot R_1 - (I_a/2a + i) \cdot R_2 = 0, \quad (9.3)$$

або розв'язавши (1.37) відносно i :

$i =$

$$(I_a/2a) \cdot (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2). \quad (9.4)$$

Враховуючи припущення про незмінність густини струму між пластинами і щіткою та рівності ширини щітки колекторній поділці, у випадку, що розглядається, очевидна пропорційність опорів R_1

та R_2 ширинам щітки $b_{щ1}$ і $b_{щ2}$, що дотикаються до пластин **1** та **2** (рис. 1.25), а самої щітки – періоду комутації T . При обертанні колектора, ширина щітки, що дотикається до пластини **2**, зростає пропорційно часу t , а ширина щітки, що дотикається до пластини **1**, зменшується пропорційно $(T - t)$. Таким чином у рівняння (1.37) замість R_1 можна підставити $(T - t)$, замість R_2 відповідно t , а замість $(R_1 + R_2) - T$:

$$i = (I_a/2a) * [(T - t) - t]/T \quad (9.5)$$

тобто:

$$i = (I_a/2a) * (1 - 2t/T). \quad (9.6)$$

Як видно із (9.6), графік зміни струму i в комутованій секції за період комутації є пряма лінія, а тому така комутація називається *прямолінійною* (рис.1.26). Вона ще називається *ідеальною*, тому що перехід щітки з однієї колекторної пластини на іншу відбувається без іскріння на колекторі.

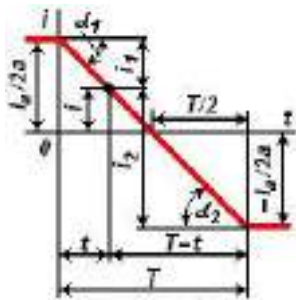


Рисунок 1.26 –
Прямолінійна комутація

Густина струму в контакті “щітка-пластина” за весь період комутації є досить важливим фактором, що визначає якість комутації. Густини струму в контакті “щітка-пластина **1**” j_1 та “щітка-пластина **2**” j_2 пропорційні, в свою чергу, тангенсу кута нахилу графіка комутації ($j_1 \equiv \tan \alpha_1$; $j_2 \equiv \tan \alpha_2$) і залишаються незмінними (так як $\alpha_1 = \alpha_2$), тому струм через першу пластину $i_1 = I_a/2a - i$ знижується, а через другу зростає $i_2 = I_a/2a + i$, пропорційно площі перекриття пластини. Таким чином, при $t = T_k/2$ струми через обидві колекторні пластини, що замикають секцію, рівні, а в самій секції струм дорівнює нулю. В кінці комутації ($t = T_k$), коли щітка відривається від пластини **1** струм через неї зменшився до нуля, площа дотику пластини і щітки рівна нулю, а отже, відсутнє і іскріння. Незмінність густини струму в контакті “щітка-пластина” може бути лише за умови, коли в комутованій секції не наводиться ЕРС, або сума ЕРС e_c , що в ній наводяться, дорівнює нулю:

$$\sum e_c = 0, \quad (9.7)$$

Наведені властивості прямолінійної комутації – незмінність густини струму під щіткою на протязі всього періоду комутації і вихід колекторної пластини із-під щітки без розривання струму – є основними властивостями, і завдяки їм цей вид комутації не супроводжується іскрінням на колекторі.

9.4. КРИВОЛІНІЙНА УПОВІЛЬНЕНА КОМУТАЦІЯ

Розглянемо тепер, які ЕРС створюються в комутованій секції і як вони впливають на процес зміни струму в секції зокрема, і на комутацію в машині взагалі.

В сучасних машинах, як уже зазначалось, період комутації дуже малий, тому швидкість зміни струму в часі di/dt досить значна, а це призводить до появи ЕРС, які зумовлені такою зміною.

Враховуючи, що секція має індуктивність L_c , при зміні струму в ній буде виникати *ЕРС самоіндукції e_L* :

$$e_L = -L_c \cdot di/dt, \quad (9.8)$$

де i – струм у комутованій секції, А.

Звичайно в кожному пазу якоря розташовано кілька активних сторін різних секцій. При цьому, враховуючи, що крок обмотки ($y_1 = \tau$) повний, в кожній із цих секцій, в свою чергу, буде відбуватися комутація, а це приведе до появи змінного магнітного потоку кожної із цих сторін і, як наслідок, до появи *ЕРС взаємоіндукції e_M* :

$$e_M = -M_c \cdot di/dt, \quad (9.9)$$

де M_c – взаємоіндуктивність секцій, що комутуються одночасно.

При положенні щіток на геометричній нейтралі машини і при відсутності додаткових полюсів в зоні секцій, що комутуються, магнітна індукція буде мати, враховуючи реакцію якоря, деяке значення $B_{p.a}$ (рис. 1.21, в). Під дією цієї індукції в комутованій секції буде створюватись ще одна ЕРС, так звана, *ЕРС крутіння e_k* :

$$e_k = B_{p.a} \cdot 2l \cdot W_s \cdot v, \quad (9.10)$$

де l – довжина пазових (активних) частин секції, м; W_s – число витків у секції; v – лінійна швидкість руху секції, м/с. Перші дві ЕРС e_L та e_M , згідно з правилом Ленца, завжди направлені назустріч зміни струму, тому їх суму ще називається *реактивною ЕРС e_p* :

$$e_p = e_L + e_M = (L_c + M_c) \cdot di/dt. \quad (9.11)$$

Ця ЕРС завжди буде *уповільнювати* зміну струму, а змінити її напрям неможливо. ЕРС крутіння, на відміну від реактивної, може мати різні напрями, в залежності від полярності поля в зоні комутації. Якщо додаткові полюси в машині відсутні і щітки розташовані на геометричній нейтралі, то напрям e_k буде співпадати з напрямом e_p . В цьому випадку в контурі комутованої секції діє сума ЕРС Σe :

$$\Sigma e = e_k + e_p, \quad (9.12)$$

яка викликає в секції додатковий струм i_{∂} , а тому загальний струм комутованої секції слід розглядати як суму двох струмів:

$$i = i_{np} + i_{\partial}, \quad (9.13)$$

де i_{np} – струм, що має місце при прямолінійній комутації, а величина додаткового струму i_{∂} може бути визначена за законом Ома:

$$i_{\partial} = \Sigma e / (R_1 + R_2), \quad (9.14)$$



де R_1 і R_2 – відповідно опори контактів “щітка-пластина 1” та “щітка-пластина 2” (рис. 1.25).

Додатковий струм приводить до зміни густини струмів через колекторні пластини, які замикаються щіткою. За умов, що розглядаються, *густина струму під краєм щітки, що збігає, буде зростати, а під краєм, що набігає, – зменшуватись, тому що додатковий струм направлений проти зміни струму прямолінійної комутації, уповільнюючи цю зміну і перетворюючи прямолінійну комутацію (рис. 1.26) в криволінійну уповільнену (рис. 1.27)*. В середині такої комутації струм у комутованій секції дорівнює не нулю, як при прямолінійній, а додатковому струму i_{∂} . Щоб цей струм знизився до нуля, необхідний якийсь час, наприклад, $\frac{1}{4}T$. Тоді за $\frac{1}{4}T$, що лишається, струм повинен зростати до $I_a/2a$ в протилежному напрямі, що й приводить до підвищення його густини під краєм щітки, який збігає. Коли щітка відривається від колекторної пластини значення струму ще не дорівнює нулю, тому енергія, що при цьому виділяється, витрачається на створення електричної дуги між краєм щітки і колекторною пластиною, яка збігає.

Очевидно, що іскріння під краєм щітки, який збігає, буде тим більше, чим більший додатковий струм комутації, пропорційний індуктивності та взаємодуктивності комутуваних секцій. Отже, для покращання комутації слід знижувати індуктивність та взаємодуктивність секцій (наприклад, зниженням числа витків) або, що ефективніше, знижувати додатковий струм іншими методами.

9.5. СПОСОБИ ПОКРАЩЕННЯ КОМУТАЦІЇ

Основна причина, як уже відзначалось, незадовільної комутації в машинах постійного струму – додатковий струм комутації, рівний:

$$i_{\partial} = \Sigma e / \Sigma R_k \quad (9.15)$$

де ΣR_k – сума електричних опорів, якими замикається додатковий струм: опір секції, опір місць паяння на півниках колекторних пластин, опір перехідного контакту між колекторними пластинами і щіткою і, нарешті, опір самої щітки.

Отже, щоб знизити додатковий струм необхідно або знизити Σe , або підвищити ΣR_k . Звідси і впливає низка способів покращання комутації.

Вибір щіток. З точки зору забезпечення задовільної комутації раціонально використовувати щітки зі значним питомим опором. Однак, допустима густина струму в таких щітках мала, що веде до збільшення розміру як щітки, так і колектора, а отже до додаткових затрат міді. Враховуючи це, такі щітки використовуються лише в машинах високої напруги з незначним робочим струмом.

В машинах постійного струму використовуються графітні, електрографітовані, вугільно-графітні та мідно-графітні щітки. Вибираються щітки у відповідності з рекомендаціями, які вироблені на основі багатолітнього досвіду проектування та експлуатації машин. Найбільш широко застосовуються в машинах постійного струму напругою (110– 440) В електрографітовані щітки. Збільшенню перехідного опору, а отже, і покращанню комутації, сприяє *політура колектора – тонка оксидна плівка на поверхні колектора*, що має підвищений електричний опір.

Зменшення реактивної ЕРС. Суттєвий вплив на сумарну ЕРС в комутованій секції має реактивна ЕРС $\Sigma e = e_k + e_p$. ЕРС взаємоіндукції e_m суттєво залежить від ширини щітки і чим ширша щітка, тим більше число пластин вона водночас перекриває, а отже, і більше секцій одночасно комутуються, і тим більша ЕРС взаємоіндукції e_m . В той же час вузькі щітки також не бажані, через їх малу механічну міцність, а також тому, що для створення необхідної площі контакту необхідно збільшувати довжину щітки, а це приводить до збільшення і довжини колектора. Найбільш раціональні щітки шириною 2 – 3 колекторні поділки.

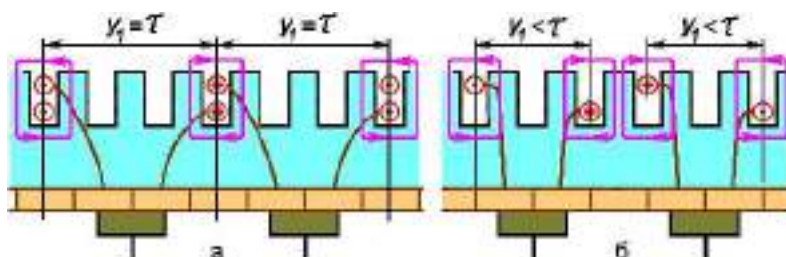


Рисунок 1. 28 – Магнітний зв'язок одночасно комутованих секцій при повному (а) та при укороченому кроці (б) обмотки

Тип обмотки також значно впливає на величину ЕРС взаємоіндукції. Так, якщо обмотка має укорочений крок ($y_1 < \tau$), то активні сторони секції, що одночасно комутуються, виявляються в різних пазах і це значно знижує ЕРС взаємоіндукції (рис. 1.28).

Зниження реактивної ЕРС секції, або її повна компенсація, можлива створенням у зоні комутації (по осі щіток) магнітного поля відповідної полярності і величини. Створюється таке поле додатковими полюсами або зсувом щіток з геометричної нейтралі.

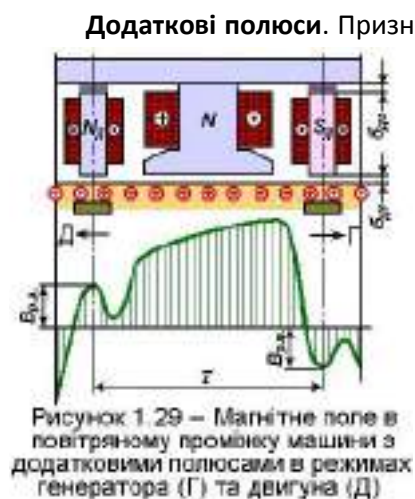


Рисунок 1. 29 – Магнітне поле в повітряному проміжку машини з додатковими полюсами в режимах генератора (Г) та двигуна (Д)

Додаткові полюси. Призначення додаткових полюсів – створити в зоні комутації магнітне поле такої величини і напрямку, щоб цим полем в комутованій секції наводилась ЕРС крутіння e_k , яка б повністю компенсувала реактивну ЕРС e_p .

Додаткові полюси розміщуються в машині між основними, а щітки при цьому устанавлюються на

геометричній нейтралі. Всі машини постійного струму потужністю більше 1 кВт мають додаткові полюси, число яких таке ж, як і основних, або в два рази менше.

Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі при наявності додаткових полюсів зображений на (рис. 1.29) (Д – напрям обертання двигуна; Г – генератора).

Якщо МРС додаткових полюсів зробити більшою (зміна МРС можлива, наприклад, зміною повітряних проміжків b_{d1} та b_{d2}), ніж потрібно для компенсації ЕРС e_p , тобто коли e_k стане більшою, ніж e_p , то сумарна ЕРС змінить свій знак, а додатковий струм комутації i_a – свій напрям на протилежний у порівнянні з тим, який він мав при уповільненій комутації (рис. 1.27). В цьому випадку графік зміни струму в комутуваній секції прийме вигляд (рис. 1.30), тобто комутація стане криволінійною прискореною. При такій комутації струм у комутуваній секції досягне нульового значення за час $t < T_k/2$, а це приведе до зниження густини струму під краєм щітки, який збігає, та підвищення під краєм, який набігає, і, як наслідок, іскріння під цим краєм щітки. Слід зазначити, що



значне іскріння під краєм щітки, який набігає, є більш небезпечним при експлуатації машини, ніж іскріння краю, який збігає, тому що іскри у цьому випадку затягуються під щітку, іонізують простір між нею і пластиною, що підвищує ступінь іскріння. Все ж деяке прискорення комутації, при якому струм у комутуваній секції i досягає значення, близького до струму в паралельній вітті $I_a/2a$, до завершення комутаційного процесу є бажаним. У цьому випадку струм i_1 краю щітки, який збігає, ще до завершення комутації буде дорівнювати нулю, що знижує ймовірність появи іскріння. У багатьох випадках такому виду комутації надається перевага перед прямолінійною.

Для забезпечення безіскрової роботи машини, обмотка додаткових полюсів повинна бути розрахована на таку МРС, яка б забезпечила компенсацію реактивної ЕРС в комутуваній секції. Щоб така компенсація забезпечувалась при будь-яких навантаженнях, обмотка додаткових полюсів вмикається послідовно з обмоткою якоря.

Додаткові полюси забезпечують задовільну комутацію в машині лише в межах номінального навантаження. При перевантаженнях машини, магнітне поле її додаткових полюсів перенасичується, що, в кінцевому результаті, приводить до уповільнення комутації.

Отримання комутаційного поля зміщенням щіток. В машинах постійного струму потужністю до 1 кВт, що виконуються без додаткових полюсів, комутаційне поле створюється зсувом щіток з геометричної нейтралі за фізичну в напрямі обертання машини, яка працює в режимі генератора і проти напрямку обертання – в режимі двигуна. При такому зсуві можна вибрати точку в якій, при даному навантаженні, комутаційне поле буде забезпечувати компенсацію реактивної ЕРС і роботу машини без іскріння між колектором та щітками.

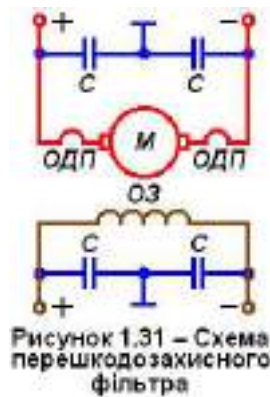
До недоліків цього способу покращання комутації слід віднести те, що *при зміні навантаження необхідно змінювати положення щіток; зсув щіток з геометричної нейтралі підсилює розмагнічувальну дію реакції якоря; при реверсуванні машини зсув щіток неможливий, так як зміна напрямку обертання вимагає зміни також і напрямку зсуву щіток.*

9.6. РАДІОПЕРЕШКОДИ ВІД КОЛЕКТОРНИХ МАШИН ТА ШЛЯХИ ЇХ ЗНИЖЕННЯ

При незадовільній комутації колекторна машина є джерелом радіоперешкод у вигляді різкого тріщання чи безперервного шуму по всьому діапазону радіочастот, що погіршують якість прийому радіохвиль, а іноді роблять його взагалі неможливим. Рівень радіоперешкод від роботи колекторних машин не повинен перевищувати значень, визначених діючими нормами.

Радіоперешкоди поширюються двома шляхами: через ефір (електромагнітне випромінювання) та через електромережу. Щоб подавляти перешкоди, що поширюються через ефір, колекторні машини екрануються шляхом заземлення корпусів машин, екранів кабелів тощо. Якщо машина з боку колектора має вікна, то вони закриваються металевими решітками або сітками, які мають надійний електричний контакт з заземленим корпусом.

Для зниження радіоперешкод, поширюваних через мережу, застосовується виконання обмоток,



що вмикаються послідовно з обмоткою якоря (найчастіше додаткових полюсів *ОДП* та послідовної обмотки збудження), з двох симетричних частин, ввімкнених до щіток різної полярності, та фільтрів (рис. 1.31). Застосування ємнісних фільтрів – основний спосіб зменшення перешкод прийому радіо. Він полягає у ввімкненні конденсаторів *С* між кожним провідником зі струмом та корпусом машини. Величина ємності найчастіше підбирається дослідним шляхом, при цьому конденсатори повинні бути розраховані на робочу напругу машини. Найбільш ефективними для фільтрів є прохідні конденсатори, у яких один вихідний кінець приєднується до корпусу, а другий проходить всередині конденсатора і є провідником струму, що сполучається з вихідним затискачем машини.

10. ТЕМА РІВНЯННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

10.1. Рівняння струмів. У генератора паралельного збудження (рис. 1.23, в) обмотка збудження виконується з мідного дроту, відносно, невеликого перерізу, має значну кількість витків, її струм, у порівнянні з номінальним, досить малий і складає (1 – 6) % від нього. Струм, що виникає в обмотці якоря I_a , розгалужується на два струми: I – струм навантаження та I_z – струм обмотки збудження:

$$I_a = I + I_z. \quad (10.1)$$

У генераторів послідовного збудження (рис. 1.23, г) обмотка збудження вмикається послідовно з обмоткою якоря і навантаженням, тому їх струми рівні:

$$I_a = I = I_z, \quad (10.2)$$

а це змушує виконувати обмотку провідниками значного перерізу з невеликою кількістю витків.

Генератор змішаного збудження (рис. 1.23, д) має на полюсах по дві обмотки. Одна з них, з великою кількістю витків, виконана з провідників незначного перерізу, вмикається паралельно з обмоткою якоря, а друга, з малим числом витків із провідників великого перерізу, послідовно. Струм якоря в такого генератора складає:

$$I_a = I + I_{z, пр}, \quad (10.3)$$

де $I_{z, пр}$ – струм паралельної обмотки збудження, А.

У генераторів незалежного збудження (рис. 1.23, а, б) струм якоря не розгалужується і рівний струму навантаження:

$$I_a = I, \quad (10.4)$$

а струм обмотки збудження (на рис. 1.23, б) визначається за законом Ома:

$$I_3 = U_3 / R_3, \quad (10.5)$$

де U_3 – напруга незалежного джерела збудження, В.

10.2. Рівняння ЕРС. Рівняння (1.51 та 1.53) слід розглядати як рівняння струмів, складені за *першим правилом Кірхгофа* для генераторів різних способів збудження. Рівняння ЕРС справедливе для всіх генераторів, незалежно від способу збудження. Це рівняння складається на основі *другого правила Кірхгофа* для контуру генератора, до якого входить обмотка якоря та навантаження. ЕРС E_a , що створюється в якорі, урівноважується падінням напруги на опорі елементів, ввімкнених послідовно з обмоткою якоря, та на опорі навантаження:

$$E_a = I_a \cdot R_a + I \cdot R_n, \quad (10.6)$$

тут:

$$R_a = R_{я} + R_{д} + R_{к.о} + R_c + R_{щ}, \quad (10.7)$$

де $R_{я}$ – опір безпосередньо обмотки якоря, $R_{д}$ – опір обмотки додаткових полюсів, $R_{к.о}$ – опір компенсаційної обмотки, R_c – опір послідовної обмотки збудження, $R_{щ}$ – опір контакту “щітка – колектор”. Слід зазначити, що деякі з цих опорів можуть бути відсутні в генераторах різних типів, при відсутності відповідних елементів. Падіння напруги на опорі навантаження $I \cdot R_n$ називається звичайно *напругою генератора U* , отже:

$$E_a = U + I_a \cdot R_a. \quad (10.8)$$

Ця ЕРС зумовлює появу струму якоря:

$$I_a = (E_a - U) / R_a \quad (10.9)$$

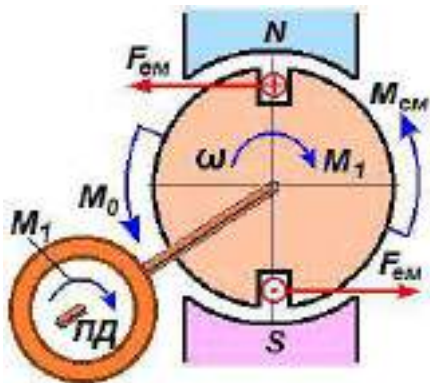


Рисунок 1.33 – Моменти, що діють на ротор генератора

10.3. Рівняння моментів. Суттєве значення має рівняння рівноваги моментів, що діють у генераторі (рис. 1.33). В режимі НХ (робота машини при відсутності навантаження) *момент*

привідного двигуна M_1 незначний і протидіє гальмівним моментам від сил тертя і вихрових струмів в залізі якоря. Сума цих моментів називається *моментом неробочого ходу* M_0 .

При роботі навантаженого генератора на провідники його якоря діють *електромагнітні сили* F_{em} , створюючи *електромагнітний момент* M_{em} (1.25), який також направлений назустріч моменту привідного двигуна. Якщо частота обертання ротора n незмінна ($n = \text{const}$), обертовий момент привідного двигуна урівноважується в режимі НХ моментом M_0 , а при навантаженні – сумою протидіючих моментів: моментом НХ M_0 і електромагнітним моментом M_{em} , тобто:

$$M_1 = M_0 + M_{em} \quad (10.10)$$

Якщо обидві частини рівняння (1.60) помножити на кутову частоту обертання ω , то отримаємо рівняння рівноваги потужностей:

$$P_1 = P_0 + P_{em}, \quad (10.11)$$

де $P_1 = M_1 \cdot \omega$ – *механічна потужність*, що підводиться до генератора привідним двигуном; $P_0 = M_0 \cdot \omega$ – *втрати НХ* – потужність, що підводиться до генератора в режимі НХ, враховуючи що ніякої корисної роботи при НХ генератор не виконує; $P_{em} = M_{em} \cdot \omega$ – *електромагнітна потужність*, яка згідно (1.28) може виражатись і як добуток ЕРС E_a та струму якоря I_a . У відповідності з (1.58) та (1.51) для генератора з паралельним збудженням будемо мати:

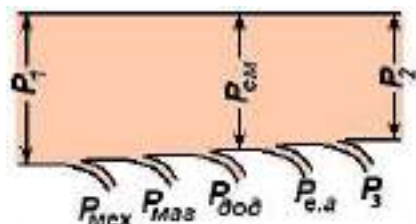


Рисунок 1.34 – Енергетична діаграма генератора постійного струму

$$P_{em} = (U + I_a \cdot R_a) \cdot (I + I_z) = U \cdot I + U \cdot I_z + I_a^2 \cdot R_a = P_2 + P_z + P_{ea}, \quad (10.12)$$

де $P_2 = U \cdot I$ – *корисна електрична потужність генератора*; $P_z = U \cdot I_z$ – потужність, що затрачується на збудження – *втрати в обмотці збудження*; $P_{ea} = I_a^2 \cdot R_a$ – *електричні втрати* на всіх елементах, що послідовно увімкнені в коло якоря, враховуючи втрати в контакті “щітка-колектор”.

Підставивши (10.12) в (10.11) і, враховуючи, що:

$$P_0 = P_{mex} + P_{маг} + P_{доп}, \quad (10.13)$$

де P_{mex} – *механічні втрати*, зумовлені силами тертя та вентиляції; $P_{маг}$ – *втрати магнітні на вихрові струми та гістерезис* (перемагнічування) пластин якоря; $P_{доп} = (1 - 2)\%$ від $P_{ном}$ – *додаткові втрати*, які важко враховуються, і тому вони задаються у відсотках від номінальної потужності, отримаємо:

$$P_1 = P_2 + P_{mex} + P_{маг} + P_{e.a} + P_z + P_{доп}. \quad (10.14)$$

Це рівняння (10.14) і є рівнянням балансу потужностей генератора з самозбудженням, на основі якого будується *енергетична діаграма* (рис. 1.34). Отже повні втрати машини ΣP :

$$\Sigma P = P_{\text{мех}} + P_{\text{маг}} + P_{\text{е.а}} + P_3 + P_{\text{дод}}, \quad (10.15)$$

і співвідношення (1.64) можна представити як:

$$P_1 = P_2 + \Sigma P. \quad (10.16)$$

Відношення корисної та підведеної потужності уявляє собою ККД генератора η :

$$\eta = P_2/P_1. \quad (10.17)$$

Звичайно ККД машин постійного струму складає (0,75 – 0,90) для машин потужність від 1 до 100 кВт і (0,90 – 0,97) для машин потужністю від 100 кВт.

10.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Спосіб збудження генераторів визначає їх властивості, які простіше всього виражаються графічним шляхом, тобто у вигляді кривих, так званих, характеристик генераторів. Звичайно розглядається залежність якої-небудь однієї величини, що характеризує роботу генератора, від другої, при незмінних інших величинах. Найбільш важливою величиною, що визначає роботу генератора, є його напруга U . Тому характеристики мають головною метою вияснити, як залежить напруга U від:

- струму збудження I_z ;
- струму навантаження I ;
- частоти обертання генератора n (кутової частоти обертання ω).

Крім цього, значний інтерес уявляє залежність струму збудження I_z від струму навантаження I при заданому характеру зміни напруги U на затискачах генератора, зумовленому вимогами його експлуатації.

Частота обертання генератора залежить від властивостей привідних двигунів. Найчастіше генератори працюють з незмінним обертанням $n = \text{const}$. Тому всі характеристики генераторів знімаються саме при незмінній частоті обертання.

Залежність напруги U від струму збудження I_z при $I = \text{const}$ і $n = \text{const}$ називається навантажувальною характеристикою, окремий випадок цієї характеристики, коли $I = 0$ – характеристика $NXU_0 = f(I_z)$, що є досить важливою для оцінки властивостей генератора.

Щоб дати відповідь на питання, як залежить напруга U від струму навантаження I , знімається *зовнішня характеристика, що уявляє залежність $U = f(I)$ при $n = \text{const}$ і при незмінному опорі в колі збудження $R_z = \text{const}$.* Остання умова означає, що при знятті зовнішньої характеристики, напруга на затискачах генератора не регулюється.

Якщо ж, навпаки, напругу U необхідно регулювати, то знімається *регульовальна характеристика*, що є залежністю $I_a = f(I)$ при $n = \text{const}$ і сталій заданій напрузі U на затискачах генератора, хоча правильніше вважати, що напруга повинна бути незмінною на затискачах приймачів енергії. В окремому випадку, коли $U = 0$, отримаємо *характеристику КЗ* $I_k = f(I_a)$. Ця характеристика має лише допоміжний характер і при дослідженнях генератора найчастіше не знімається.

11. ТЕМА РЕЖИМИ РОБОТИ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Як уже відзначалось, машина постійного струму оборотна, тобто може працювати як в режимі двигуна, так і в режимі генератора. Розглянемо на прикладі двигуна паралельного збудження (в коло якоря якого введений додатковий опір), за яких умов відбувається перехід такого двигуна з одного режиму роботи в інший. Припустимо, що, в процесі зміни навантаження, магнітний потік машини залишається незмінним $\Phi = \text{const}$. В цьому випадку, згідно з (1.85), $\omega = f(I_a)$ є прямою, так як напруга

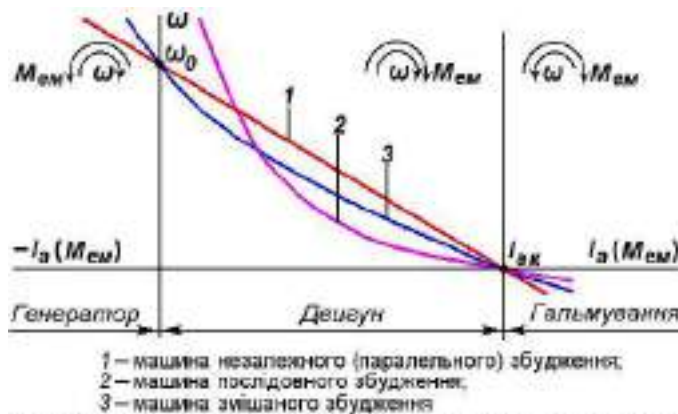


Рисунок 1.47 – Режимы работы машины постоянного тока

I_{ak} відповідає струму якоря, який виникає при пуску двигуна. Слід зазначити, що додатне значення струму на цьому відрізку забезпечується тим, що напруга U , прикладена до обмотки якоря двигуна, більша ніж проти-ЕРС E_a , яка в цій обмотці створюється ($U > E_a$) – це і є умовою роботи машини в *режимі двигуна*.

На відрізку $\omega > \omega_0$ зростання частоти обертання викликає збільшення E_a вище від напруги U , тому струм змінює свій напрям (1.86) і стає направленим не в машину, а в мережу. Причиною зростання частоти обертання може бути будь-який механічний момент, що співпадає з напрямом обертання ротора машини, а електромагнітний момент, як і струм, змінює свій напрям і стає гальмівним. Тому цей режим роботи називається *генераторним*, або *режимом рекуперативного гальмування з віддачею потужності до мережі*.

На ділянці характеристики нижче точки I_{ak} напрям частота обертання не співпадає з напрямом електромагнітного моменту, який розвиває машина. Це можливо в тих випадках, коли на валу машини є активний статичний момент, більший від пускового моменту, що створює двигун, наприклад момент вантажу, який опускається краном. Такий режим роботи називається *гальмівним*, або *гальмуванням противмиканням*. Як видно з (рис. 1.47), значення струму в режимі гальмування досить велике – більше від I_{ak} , тому що напрям обертання змінився, а отже величина струму пропорційна не різниці напруги та ЕРС, яка також змінила напрям, а їх сумі. При такому гальмуванні в коло ротора необхідно увести додатковий опір, щоб обмежити величину струму. Гальмування противмиканням може застосовуватись не лише при опусканні вантажів краном, а і при необхідності

швидкої зупинки машини шляхом реверсування. При цьому ротор продовжує обертатись у тому ж напрямі, який він мав до реверсування, а електромагнітний момент направлений, завдяки реверсуванню, у зворотний.

У двигуна послідовного збудження, крива 2 на (рис. 1.47), при зміні струму якоря змінюється і магнітний потік (1.70) тому $\omega = f(I_a)$ криволінійна. Ця крива не перетинає вісь ω , тобто двигун з послідовним збудженням не може перейти в генераторний режим. Фізично це пояснюється тим, що зростання частоти обертання ω не може збільшувати ЕРС якоря E_a , через зниження струму якоря I_a , а отже, і магнітного потоку. Таким чином, двигун послідовного збудження може мати лише два режими роботи – двигуна та гальмування противмикання.

Двигун змішаного збудження, як і двигун паралельного, має всі три режими: крива 3 (рис. 1.47). *Всі характеристики* (рис. 1.47) *відповідають випадку, коли в коло якоря ввімкнений додатковий опір.*

11.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНІВ

Властивості двигунів, як і генераторів, оцінюються їх характеристиками, основними з них є робочі, моментні, швидкісні та механічні.

Робочі характеристики двигуна – це сукупність залежностей частоти обертання $n(\omega)$, струму навантаження I , підведеної потужності P_1 , корисного моменту на валу M_2 , коефіцієнта корисної дії η від корисної потужності на валу P_2 при незмінних напрузі U та опорі в колі збудження R_3 . Цими характеристиками визначаються експлуатаційні властивості машини.

$$n(\omega); I; P_1; M_2; \eta = f(P_2). \quad (11.1)$$

Враховуючи, що $P_1 = U \cdot I$ і незмінність напруги, що є умовою знімання цих характеристик, характеристики струму $I = f(P_2)$ та підведеної потужності $P_1 = f(P_2)$ будуть, якщо виразити їх у відносних одиницях, зображуватись однією лінією.

Робочі характеристики двигуна завжди будуються в одній системі координат.

Моментні характеристики – низка залежностей електромагнітного моменту M_{em} від струму якоря I_a , тобто $M_{em} = f(I_a)$ при $U = const; R_3 = const$.

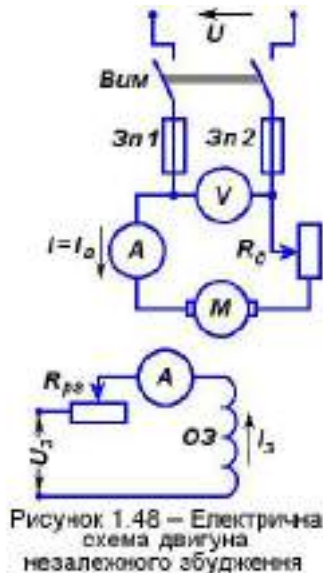
Швидкісні характеристики – це залежності частоти обертання $n(\omega)$ від струму якоря I_a , – $n(\omega) = f(I_a)$ при $U = const; R_3 = const$.

Механічні характеристики – залежності частоти обертання $n(\omega)$ від електромагнітного моменту M_{em} – $n(\omega) = f(M_{em})$ при $U = const; R_3 = const$. Слід зазначити, що швидкісні та механічні характеристики, якщо виражати величини у відносних одиницях, для двигунів незалежного та паралельного збудження будуть зображуватись одними лініями, враховуючи (1.25).

Швидкісні та механічні характеристики можуть бути *природними*, якщо напруга, що підводиться до двигуна, номінальна, додатковий опір в колі якоря відсутній, магнітний потік номінальний. Коли ж будь-яка з перерахованих величин відрізняється від номінальної, то характеристики називаються *штучними*:

- штучна реостатна, якщо в коло якоря увімкнуту додатковий опір R_a ;
- штучна на зниженій напрузі, коли напруга менша від номінальної;
- штучна при ослабленому полі, в коло збудження ввімкнений регульовальний опір R_{pe} , який знижує струм збудження і відповідно магнітний потік.

11.2. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ



До двигунів незалежного збудження відносяться двигуни, обмотка збудження яких живиться від незалежного джерела, або двигуни з магнітоелектричним збудженням. Схема, за якою можна знімати характеристики двигуна електромагнітного збудження наведена на (рис. 1.48). Межі вимірювання приладів у такій схемі вибирається за номінальними даними двигуна.

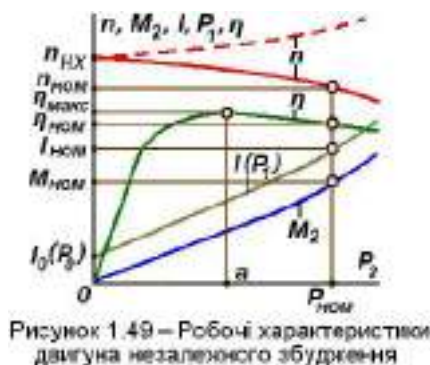
В коло обмотки якоря вмикається додатковий опір R_a , який обмежує пусковий струм при реостатному пуску і дає можливість змінювати частоту обертання двигуна при заданому навантаженні. Резистором R_{pe} устновлюється необхідний струм збудження, струм навантаження змінюється навантажувальним пристроєм, наприклад, електромагнітним гальмом, яке дозволяє змінювати момент навантаження M_2 від нуля до $(1,1 - 1,25) M_{ном}$, що може бути визначений як:

$$M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном} \quad (11.2)$$

або

$$M_{ном} = 9,55 P_{ном} / n_{ном} \quad (11.3)$$

Робочі характеристики. Ці характеристики знімаються і будуються при номінальних незмінних значеннях напруги ($U = U_{ном} = \text{const}$), магнітного потоку НХ ($\Phi_0 = \Phi_{0ном} = \text{const}$), що створюється обмоткою збудження чи постійними магнітами, та опору кола якоря ($R_a = \text{const}$).



Для аналізу залежності $n = f(P_2)$, що практично є природною швидкісною характеристикою, використовується вираз (1.85) з якого видно, що на частоту обертання двигуна впливає, при незмінності величин U , Φ_0 та R_a і збільшенні навантаження, тільки струм якоря I_a , збільшуючи падіння напруги в колі якоря, а отже знижуючи чисельник виразу. Крім цього, ріст струму якоря супроводжується зростанням реакції якоря, яка найчастіше викликає зменшення потоку Φ_0 на величину $\Delta\Phi$ і таким чином результатний потік $\Phi = \Phi_0 - \Delta\Phi$, тобто знижується не тільки чисельник (1.85), а і його знаменник. В залежності від співвідношення цього зниження, визначається і крива характеристики $n = f(P_2)$: якщо переважає зниження чисельника – суцільна лінія n (рис. 1.49), коли ж знаменника – пунктирна. Слід зазначити, що стійка робота двигуна можлива тільки за умови падаючої характеристики (суцільна крива), що буде показано дещо далі. Робота двигуна, що супроводжується зростанням частоти обертання (пунктирна крива) внаслідок розмагнічувальної дії реакції якоря недопустима, тому що при значних

навантаженнях можливе необмежене зростання частоти обертання, так званий *рознос двигуна* – аварійний режим при якому зростання частоти обертання викликає такі відцентрові сили, що діють на ротор, від яких він руйнується.

Залежність струму навантаження I та потужності P_1 , що споживається з мережі, враховуючи, що $P_1 = U \cdot I$ (див. В.5) та незмінність напруги, можуть зображуватись однією кривою $I(P_1)$ (рис. 1.49) за умови побудови характеристики в масштабах, які відрізняються у величину напруги. В режимі НХ ($P_2 = 0$) на осі ординат характеристика відсікає точку $I_0(P_0)$ – струм НХ та втрати НХ (1.63). Величина струму НХ I_0 незначна (2 – 5) % від номінального струму, ним, у відповідності з (1.25), створюється момент НХ M_0 .

Характеристика $M_2 = f(P_2)$ визначається залежністю, по аналогії з (1.90), $M_2 = 9,55P_2/\pi$ і при $\pi = \text{const}$, мала б вигляд прямої. Однак зі зростанням навантаження частота обертання знижується, тому характеристика криволінійна.

Графік зміни ККД крива $\eta = f(P_2)$ має кілька характерних точок: в режимах НХ та КЗ двигун, не виконуючи корисної роботи, має ККД рівний нулю, при навантаженні коли постійні втрати (магнітні та на збудження) рівні змінним (електричним та механічним) – точка *a*, ККД досягає максимального значення, і дещо знижується при номінальному навантаженні $\eta_{\text{ном}}$.

При номінальному навантаженні $P_{\text{ном}}$ всі характеристики мають відповідні точки $\pi_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$, $M_{\text{ном}}$, а точка $P_{1\text{ном}}$ на (рис. 1.49) співпадає з точкою $I_{\text{ном}}$.

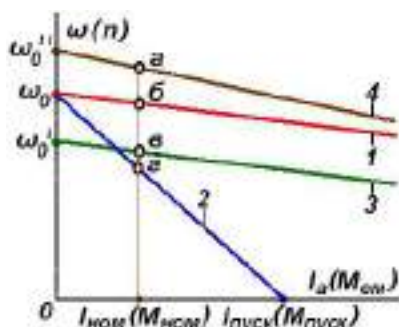
Швидкісні та механічні характеристики. В процесі роботи магнітний потік двигуна знижується $\Phi = \Phi_0 - \Delta\Phi$, тому вираз швидкісної характеристики (1.85) можна представити:

$$\omega = (U - I_a R_a) / [k \cdot (\Phi_0 - \Delta\Phi)] \quad (11.4)$$

Враховуючи, що ця характеристика розглядається як робоча і вище описана, доцільно розглянути не лише її, а і штучні швидкісні характеристики, знехтувавши розмагнічувальною дією реакції якоря $\Delta\Phi$, і представивши (1.85) як:

$$\omega = [U - I_a (R_a + R_d)] / (k \cdot \Phi), \quad (11.5)$$

Почленний поділ (11.5) на знаменник виразу дає:



1 – природна; 2 – штучна реостатна; 3 – штучна на зниженій напрузі; 4 – штучна при ослабленому полі
Рисунок 1.50 – Швидкісні та механічні характеристики двигуна незалежного збудження

$$\omega = \omega_0 - I_a (R_a + R_d) / (k \cdot \Phi), \quad (11.6)$$

де $\omega_0 = U / (k \cdot \Phi)$ – *кутова частота обертання ідеального НХ* (НХ, при якому ротор обертається, а струм рівний нулю, що реально неможливо); $(R_a + R_d) / (k \cdot \Phi)$ – *нахил характеристики*. На відміну від реальних характеристик, характеристики, побудовані за (1.93), будуть зображені прямими лініями (рис. 1.50), тому що (1.93) виражає рівняння прямої $\omega = f(I_a)$.

Природна характеристика **1** розпочинається в точці ідеального НХ і проходить з мінімальним нахилом до осі абсцис, маючи незначне зниження частоти обертання $\Delta\omega$:

$$\Delta\omega = (\omega_0 - \omega_{ном}) \cdot 100 / \omega_{ном}, \quad (11.7)$$

що складає не більше (2 – 8) %, тому вона називається *жорстокою характеристикою*.

Додатковий опір штучної реостатної характеристики **2** на (рис. 1.50) вибраний таким чином, щоб пусковий струм $I_{пуск} \approx 2I_{ном}$, що забезпечує можливість реостатного пуску цього двигуна на даній характеристиці з точки $I_{пуск}$ ($M_{пуск}$). Такий опір суттєво підвищує її нахил, тому вона називається *м'якою характеристикою*. Кутова частота обертання ідеального НХ така ж, як і у природної характеристики. Як витікає із (11.6), зміна величини R_d не вплине на значення ω_0 , але пропорційно змінює нахил.

Штучна характеристика на зниженій напрузі **3**, на відміну від реостатної характеристики, має такий же нахил, що і у природної (адже зміна напруги на нахил характеристики не впливає), але меншу кутову частоту обертання ідеального НХ ω_0' . Подальша зміна напруги буде переміщувати пряму **3** паралельно самій собі нижче при зниженні напруги і вище – при її підвищенні, не змінюючи жорсткості.

Для двигуна незалежного збудження з постійними магнітами неможливо зняти характеристику при ослабленому полі, тому така штучна характеристика має місце тільки у двигунів електромагнітного збудження – пряма **4**. Ця характеристика, у порівнянні з природною, має вищі і нахил, і кутову частоту обертання ідеального НХ ω_0'' . Будь-яка зміна магнітного потоку буде відповідно змінювати обидва ці параметри характеристики.

Визначивши із (1.25) значення струму якоря $I_a = M_{ем} / (k \cdot \Phi)$ і підставивши його в (11.6), отримаємо аналітичний вираз механічних характеристик $\omega = f(M_{ем})$:

$$\omega = \omega_0 - M_{ем} \cdot (R_a + R_d) / (k^2 \cdot \Phi^2), \quad (11.8)$$

з якого витікає, що останні мають такий же вид, як і швидкісні характеристики. Побудовані для тих же значень напруги і потоку у відповідному масштабі вони будуть зображуватись тими ж лініями, що і швидкісні характеристики даного двигуна (рис. 1.50).

Моментна характеристика. Залежність $M_{ем} = f(I_a)$ (рис. 1.51) впливає із формули

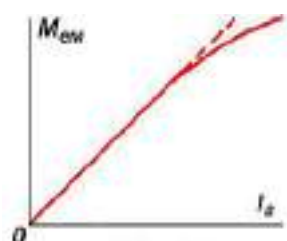
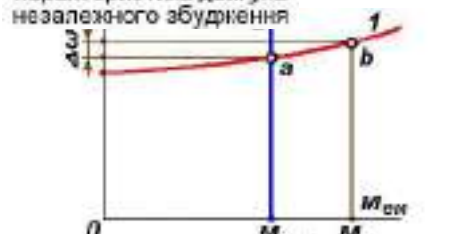


Рисунок 1.51 – Моментна характеристика двигуна незалежного збудження

електромагнітного моменту (1.25) і побудова такої характеристики не має сенсу при незмінності магнітного потоку, тому вона будується для врахування розмагнічувальної дії реакції якоря на обертовий момент двигуна:

$$M_{ем} = k \cdot (\Phi_0 - \Delta\Phi) \cdot I_a. \quad (11.9)$$



1 – механічна характеристика двигуна;
2 – механічна характеристика механізму
Рисунок 1.52 – Характеристики до визначення стійкості роботи двигуна з механізмом

Якби магнітний потік залишався незмінним, то електромагнітний момент був би пропорційний струму якоря на (рис. 1.51) така характеристика зображена пунктирною лінією. Дійсна ж характеристика через зниження магнітного

потоків буде відхилятися від прямої (суцільна лінія). Таке відхилення найчастіше незначне і в практичних розрахунках може не враховуватись.

Стійкість роботи двигуна. В реальних умовах робота двигуна постійного струму незалежно від способу збудження може бути стійкою і нестійкою. Останнє має місце при зростаючих механічних характеристиках пряма 1 на (рис. 1.52). Тут же подана механічна характеристика виробничого механізму – пряма 2 паралельна осі ординат з незмінним механічним моментом $M_{cm} = \text{const}$. В точці аспостерігається рівновага моментів:

$$M_{em} = M_{cm}, \quad (11.10)$$

що відповідає усталеному режиму роботи при $\omega = \text{const}$.

Якщо з якоїсь причини кутова частота обертання зростає (наприклад, через розмагнічувальну дію реакції якоря) на величину $\Delta\omega$, то відповідно зростає і електромагнітний момент до значення M_1 , що відповідає роботі в точці b , де виникає додатний динамічний момент, тому що $(M_{em} - M_{cm}) > 0$. Під дією цього моменту частота обертання продовжить зростати до аварійного розносу. Якщо на такій характеристиці частота обертання знизиться, відповідно знизиться і момент, отже буде мати місце $(M_{em} - M_{cm}) < 0$, і частота обертання буде неухильно знижуватись до зупинки. Як і у попередньому випадку це буде аварійний режим, адже до нерухомого двигуна прикладена номінальна напруга (аварійне КЗ).

Аналогічно можна показати, що при падаючій механічній характеристиці робота приводу буде стійкою, тому що будь-яке відхилення кутової частоти обертання на $\pm \Delta\omega$, буде викликати появу надлишкового моменту, направлено на відновлення рівноваги. В загальному вигляді критерієм стійкої роботи електроприводу є нерівність

$$dM_{em}/d\omega < dM_{cm}/d\omega. \quad (11.11)$$

Іноді при проектуванні двигунів незалежного збудження з метою зниження їх габаритів і маси збільшується густина струму та індукція у повітряному проміжку. В таких двигунах розмагнічувальна дія реакції якоря особливо значна і отримати падаючу механічну характеристику неможливо. В таких машинах малої та середньої потужності передбачається спеціальна обмотка з кількох витків, що розташовується на полюсах і вмикається послідовно з обмоткою якоря. Магнітний потік цієї обмотки частково компенсує потік реакції якоря, стабілізуючи основний магнітний потік полюсів (звідси назва цієї обмотки – *стабілізаційна*). Механічні характеристики таких двигунів будуть падаючими, а робота стійкою. Незважаючи на наявність послідовної обмотки збудження такі двигуни не вважаються двигунами змішаного збудження.

11.3. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Принципова схема такого двигуна представлена на (рис. 1.53).



В коло обмотки якоря вмикається додатковий опір R_a , який обмежує пусковий струм при реостатному пуску і дає можливість змінювати частоту обертання двигуна при заданому навантаженні. Регульовальний опір R_{p2} в колі обмотки збудження дозволяє знизити струм збудження, а отже, і магнітний потік. В момент пуску він виставляється в положення, що відповідає нульовому значенню опору.

Враховуючи, що коло обмотки збудження ввімкнене на напругу мережі U , що є незмінною, як і напруга незалежного джерела, то всі характеристики такого двигуна будуть такими ж, як і характеристики двигуна незалежного збудження, і їх окремий розгляд немає сенсу.

12. ТЕМА ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

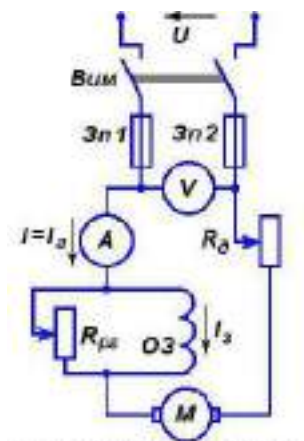


Рисунок 1.54 – Електрична схема двигуна послідовного збудження

Характерною особливістю двигунів послідовного збудження є те, що струм якоря I_a є одночасно і струмом збудження I_z , тому що відповідні їх обмотки сполучені послідовно (рис. 1.54).

Як і у схемах двигунів незалежного та паралельного збудження, в електричній схемі двигуна послідовного збудження використовуються додатковий R_d та регульовальний R_{pz} резистори, останній, на відміну від схеми двигунів незалежного та паралельного збудження, вмикається паралельно обмотці збудження, шунтуючи (при необхідності регулювання) її, і тим самим зменшуючи величину струму збудження у порівнянні зі струмом якоря.

Послідовне сполучення обмоток збудження та якоря суттєво впливає на характеристики цього двигуна, хоча рівняння швидкісних (1.93) та механічних (1.95) характеристик мають такий же вигляд, що і для уже розглянутих двигунів незалежного та паралельного збудження.

Так як магнітний потік такого двигуна є функція струму якоря ($I_a = I_z$), то залежність $\Phi = f(I_a)$ називається магнітною характеристикою (рис. 1.55). Якщо для спрощення вважати, нехтуючи насиченням магнітної системи, що залежність між потоком і струмом якоря лінійна, пунктирна лінія на (рис. 1.55), то:

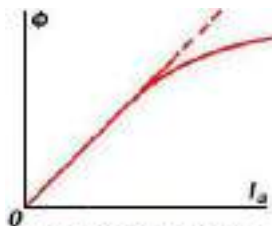


Рисунок 1.55 – Магнітна характеристика двигуна послідовного збудження

$$\Phi = k_\Phi \cdot I_a, \quad (12.1)$$

де k_Φ – коефіцієнт пропорційності між потоком і струмом, враховуючи (1.25), електромагнітний обертовий момент такого двигуна можна представити:

$$M_{em} = k \cdot k_\Phi \cdot I_a^2. \quad (12.2)$$

Як видно із (1.100) момент, що його розвиває двигун послідовного збудження, пропорційний квадрату струму якоря ($M_{em} \propto I_a^2$), тоді як у інших двигунів постійного струму така залежність пряма. Ця обставина суттєво впливає на вигляд всіх характеристик двигуна послідовного збудження та на можливості його використання.

Робочі характеристики. Ці характеристики (рис. 1.56) знімаються за електричною схемою (рис. 1.54). При цьому двигун навантажується, наприклад електромагнітним гальмом, до значення струму $(1,15 - 1,25) I_{ном}$,

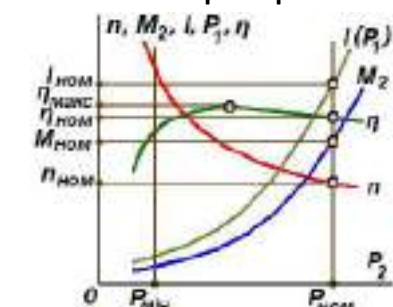


Рисунок 1.56 – Робочі характеристики двигуна послідовного збудження

а потім навантаження поступово зменшується до величини $P_{мін}$, нижче якої через надмірне зростання частоти обертання двигун розвантажувати не можна. Таким чином характеристики двигуна

послідовного збудження не мають точок в режимі НХ через ймовірність розносу. $P_{\min}$, як правило, не нижче (20 – 25) % від $P_{\text{ном}}$. Слід зазначити, що мікродвигуни (потужністю до 100 Вт) послідовного збудження можуть працювати в режимі НХ, тому що у них момент M_0 , зумовлений втратами у самому двигуні, відносно великий. Щоб запобігти розносу, вали потужних двигунів послідовного збудження жорстко з'єднуються з робочим механізмом муфтою або зубчатою передачею. Застосування ремінних з'єднань не допускається, так як при обриві, чи скиданні ременю, двигун може піти в рознос. Залежності $I = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$, $M_2 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ мають приблизно такий же характер, як і у двигунів незалежного та паралельного збудження, а залежність $n = f(P_2)$ має різко виражений нелінійний характер (така характеристика називається *м'якою*). Різке зростання частоти обертання при зниженні навантаження зумовлюється не тільки зростанням чисельника виразу (1.85), а і зниженням його знаменника.

12.1. Швидкісні та механічні характеристики. Як уже зазначалось, рівняння цих характеристик ті ж, що і у двигунів незалежного та паралельного збудження і визначаються виразами (1.93) та (1.95). Якщо ж (1.99) підставити у (1.85) то частоту обертання двигуна послідовного збудження можна виразити:

$$\omega = (U - I_a \cdot R_a) / (k \cdot k_\Phi \cdot I_a) \quad (12.3)$$



Так як падіння напруги в колі якоря $I_a \cdot R_a$ незначне і при $I_a = I_{a \text{ ном}}$ складає (2 – 4) % від $U_{\text{ном}}$, то зміна чисельника (1.101), при зміні струму якоря, досить незначна, у порівнянні зі зміною знаменника, і *природна швидкісна (механічна) характеристика* 2 (рис. 1.57) $\omega = f(I_a) [\omega = f(M_{\text{ем}})]$ носить гіперболічний характер. Особливістю цієї характеристики є її значна крутизна при малих струмах навантаження. Збільшення частоти обертання при таких навантаженнях зумовлене відповідним зниженням магнітного потоку. Дійсна характеристика $\omega = f(I_a)$ при струмах, що перевищують (0,7 – 0,8) $I_{\text{ном}}$, буде відхилятися від гіперболічної залежності (штрихова лінія). Пов'язано це з тим, що при значних струмах, у зв'язку з насиченням магнітного кола, магнітний потік, із зростанням струму, зростає на менше значення, ніж витікає із (1.99), через що кутова частота обертання стає дещо більшою. Крім цього розмагнічувальна дія реакції якоря також знижує магнітний потік, а це ще збільшує частоту обертання.

Штучна реостатна характеристика цього двигуна 4 має ще більш м'який характер і дозволяє здійснити пуск при відносно незначному пусковому моменті $M_{\text{пуск}}$. Досягається така характеристика шляхом ввімкнення додаткового опору в коло двигуна. *Характеристика двигуна на зниженій напрузі* 3 при незначних навантаженнях має більш крутий нахил, а при навантаженнях близьких до номінальних, практично, повторює, при нижчій частоті обертання, природну характеристику. *Штучна при ослабленому полі характеристика* двигуна 1 може бути отримана шляхом шунтування обмотки збудження регульовальним опором R_{pz} (рис. 1.54).

Враховуючи особливості двигуна послідовного збудження, а саме, квадратичну залежність електромагнітного моменту від струму якоря (1.100), такі двигуни використовують там, де існують важкі умови пуску і роботи та необхідно регулювати частоту обертання в широких межах, наприклад, електротранспорт, електропривод прокатних станів тощо. Пояснюється це тим, що при значних змінах навантаження, що супроводжуються поштовхами моменту, струм і потужність, що

споживаються з мережі, будуть змінюватися у меншій мірі, ніж у двигунів незалежного та паралельного збудження. Так для двигуна послідовного збудження струм якоря, відповідно до (1.99)

$$I_a = \sqrt{M_{em}} / (k \cdot k_\Phi), \quad (12.4)$$

тобто для такого двигуна $I_a \equiv \sqrt{M_{em}}$ тоді як у двигунів паралельного збудження при $\Phi = \text{const}$, згідно (1.25) $I_a \equiv M_{em}$. Враховуючи незмінність напруги мережі, відповідну пропорційність має і потужність, що споживається з мережі $P_1 = U \cdot I$.

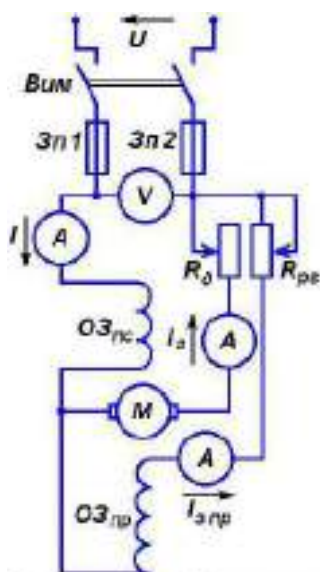


Рисунок 1.58 — Електрична схема двигуна змішаного збудження

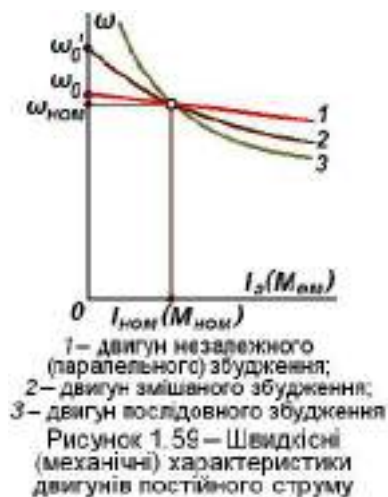
12.2. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Принципова електрична схема двигуна змішаного збудження зображена на (рис. 1.58), вона включає в себе, як і схеми двигунів з іншими способами збудження, вимірювальні прилади, підібрані за номінальними даними двигуна, додатковий R_d та, ввімкнутий у коло паралельної обмотки збудження $OЗ_{пр}$, регулювальний R_{pe} резистори. В таких двигунах послідовна $OЗ_{пс}$ і паралельна обмотки збудження вмикаються так, щоб магнітні потоки, які вони створюють, співпадали:

$$\Phi = \Phi_{пр} + \Phi_{пс}, \quad (12.5)$$

де $\Phi_{пр}$ — магнітний потік, створюваний паралельною обмоткою, $B\Phi$; $\Phi_{пс}$ — магнітний потік, створюваний послідовною обмоткою збудження, $B\Phi$.

Результатний потік Φ за рахунок обмотки послідовного збудження буде зростати зі зростанням струму якоря. Збільшення магнітного потоку буде тим значніше, чим більше витків має ця обмотка. Зустрічне ввімкнення обмоток збудження веде до зниження результатного потоку і, як наслідок, зростання частоти обертання при збільшенні навантаження. В такому випадку (див. 1.6.6) робота двигуна виявиться нестійкою, а отже і неможливою.



Всі характеристики двигунів змішаного збудження займають проміжні положення між відповідними характеристиками двигунів паралельного та послідовного збудження. Якщо послідовна обмотка збудження має незначну кількість витків (називається така обмотка слабкою), то характеристики наближаються до характеристик двигуна паралельного збудження, якщо ж ця обмотка сильна — до характеристик двигуна послідовного збудження. На (рис. 1.59) представлені для порівняння природні швидкісні (механічні) характеристики двигуна незалежного (паралельного) збудження 1, двигуна змішаного збудження 2 та двигуна послідовного збудження 3. При цьому вважається, що всі три двигуна мають однакові номінальні дані. Частота обертання при ідеальному НХ ($I_a = 0$ та $M_{em} = 0$) ω_0' у двигуна змішаного збудження має кінцеве значення і визначається

ПОТОКОМ $\Phi_{пр}$.

Двигуни змішаного збудження використовуються, в залежності від *магніторушійної сили* послідовної обмотки збудження, або замість двигунів паралельного, або замість двигунів послідовного збудження, а також там, де необхідні значні пускові моменти, швидке прискорення при розгоні, стійка робота, що допускає лише незначне зниження частоти обертання при збільшенні навантаження на валу (прокатні стани, вантажні підйомники, насоси, компресори тощо).

12.3. УНІВЕРСАЛЬНІ КОЛЕКТОРНІ ДВИГУНИ

Універсальний двигун – це такий двигун, який може працювати як від мережі постійного, так і від мережі змінного струму.

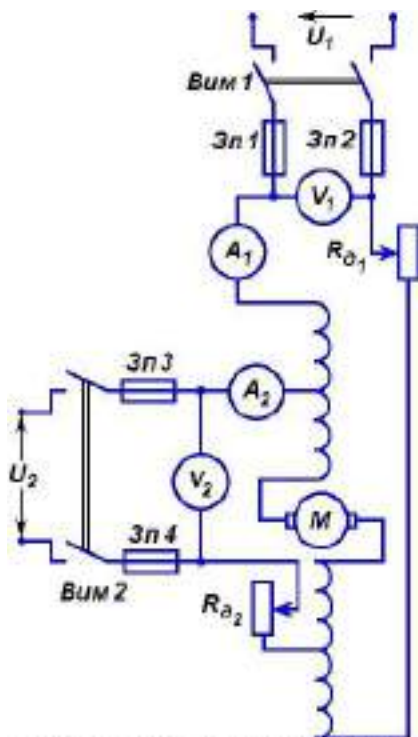


Рисунок 1.60 – Електрична схема універсального колекторного двигуна

Будь-який колекторний двигун постійного струму також може працювати і від мережі змінного струму. Пояснюється це тим, що при переході від додатного півперіоду напруги до від'ємного, при живленні змінним струмом, напрям електромагнітного моменту не змінюється в результаті одночасної зміни напрямку струму як в якорі, так і в обмотці збудження, тобто зміною полярності полюсів при зміні струму в обмотці якоря.

Однофазні колекторні двигуни переважно мають послідовне збудження (рис. 1.60), чим забезпечується достатній електромагнітний момент. Паралельне збудження таких двигунів не застосовується через незначний обертовий момент, що розвиває двигун при такому збудженні. Пояснюється це тим, що обмотка паралельного збудження має значну індуктивність і кут між її струмом та струмом якоря досить великий, а це знижує електромагнітний момент, який пропорційний косинусу кута між струмом якоря та потоком основних полюсів. При послідовному збудженні $I_a = I_z$, а отже кут між струмом якоря та потоком обмотки збудження незначний, а електромагнітний момент достатній.

При живленні змінним струмом будуть мати місце пульсації моменту, але це практично не впливає на роботу двигуна, тому що ці пульсації згладжуються за рахунок моменту інерції ротора, який обертається.

Конструктивно універсальні колекторні двигуни відрізняються від двигунів постійного струму шихтованими з електротехнічної сталі ярмом і основними полюсами. Це дає можливість скоротити магнітні втрати в статорі при роботі на змінному струмі.

Основний недолік універсальних двигунів – важкі умови комутації при живленні змінним струмом. Пояснюється це тим, що в комутованій секції крім реактивної ЕРС та ЕРС крутіння, змінним магнітним потоком основних полюсів, створюється ще і трансформаторна ЕРС E_{mp} :

$$E_{mp} = 4,44 f_1 \cdot w_c \cdot \Phi_{маск}, \quad (12.6)$$

де f_1 – подвійна частота мережі змінного струму; w_c – число витків секції; $\Phi_{\text{макс}}$ – максимальне значення

змінного магнітного потоку обмотки збудження.

Для зниження $E_{\text{тр}}$ обмотка якоря виконується з одновиткових секцій і зменшується магнітний потік полюса, а тому, щоб потужність двигуна не змінилась, збільшується число полюсів. Застосування додаткових полюсів дозволяє досягти повної компенсації трансформаторної ЕРС лише при визначених струмі та частоті обертання. При інших режимах роботи умови комутації досить складні і це викликає іскріння між щітками та колектором.

Регулювання частоти обертання і реверсування універсального колекторного двигуна виконується так, як і в двигунах постійного струму послідовного збудження.

В універсальних двигунах намагаються отримати приблизно однакові характеристики як на постійному, так і на змінному струмі. Досягається це тим, що обмотка збудження виконується з відпайками: при роботі на постійному струмі використовується вся обмотка, а при змінному – лише її частина (рис. 1.60).



Розбіжність між характеристиками при живленні змінним та постійним струмом (рис. 1.61) пояснюється тим, що при роботі на змінному струмі (крива 2) на величину і фазу струму впливають індуктивні опори обмоток якоря і збудження. Слід зазначити також, що характеристики при роботі від мережі постійного струму (крива 1) жорсткіші, ніж при роботі від мережі змінного струму. Так при номінальному навантаженні струм і потужність, що споживаються з мережі на постійному струмі нижчі, а ККД вищий, ніж при живленні змінним струмом, що викликано магнітними втратами в статорі двигуна.

Універсальні колекторні двигуни мають широке використання: в автоматиці; для приводу різного електроінструменту з важкими умовами пуску та роботи (наприклад електродриль); там, де необхідно створити частоту обертання таку, яку неможливо отримати двигунами змінного струму (наприклад пиłosоси, кухонні комбайни тощо); в пристроях, що можуть використовуватися як у мережі постійного, так і в мережі змінного струму (наприклад електробритви) тощо.

13. ТЕМА ВСТУП. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

13.1. Мета та задачі дисципліни.

Електропривод - це керована електромеханічна система. Її призначення - перетворювати електричну енергію в механічну й зворотно і управляти цим процесом.

Електропривод має два канали - силовий і інформаційний (рис. 1.1). По першому транспортується преутворена енергія (широкі стрілки на рис. 1.1), по другому здійснюється керування потоком енергії, а також збір і обробка відомостей про стан і функціонування системи, діагностика її несправностей (тонкі стрілки на рис. 1.1).

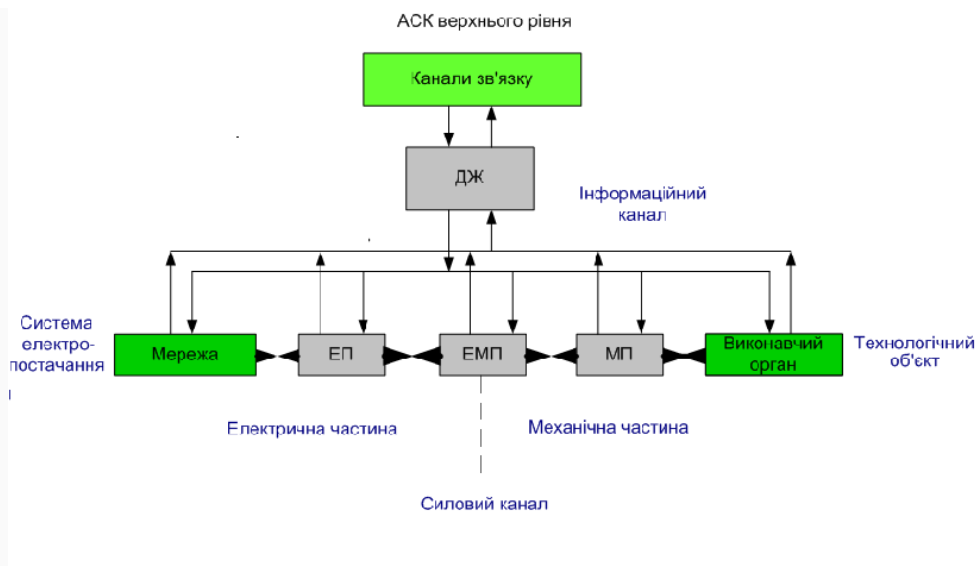


Рис. 1.1. Загальна структура електропривода

Силовий канал у свою чергу складається із двох частин - електричної і механічної й обов'язково містить сполучну ланка- електромеханічний перетворювач.

В **електричну частину** силового каналу входять пристрої *ЕП*, що передають електричну енергію від джерела живлення (шин промислової електричної мережі, автономного електричного генератора, акумуляторної батареї й т.п.) до електромеханічного перетворювача *ЕМП* і зворотно і здійснюючі, якщо це потрібно, перетворення електричної енергії.

Механічна частина складається з рухливого органа електромеханічного перетворювача, механічних передач і виконавчого органа установки, у якому корисно реалізується механічна енергія.

Електропривод взаємодіє із **системою електропостачання** або джерелом електричної енергії, з одного боку, з **технологічною установкою** або машиною, з іншого боку, і нарешті, через інформаційний перетворювач *ІП* з **інформаційною системою більше високого рівня**, часто з людиною - оператором, із третьої сторони (рис. 1.1).

Можна вважати, що електропривод як підсистема входить в указані системи, являючись їхньою частиною. Дійсно, фахівця з електропостачання електропривод звичайно цікавить як споживач електроенергії, технолога або конструктора машин - як джерело механічної енергії, інженера, що розробляє або експлуатує АСУ, - як розвинений інтерфейс, що зв'язує його систему з технологічним процесом або системою електропостачання.

Практично всі процеси, пов'язані з механічною енергією, рухом, здійснюються електроприводом. Виняток становлять лише автономні транспортні засоби (автомобілі, літаки, деякі види рухомого складу, судів), що використовують неелектричні двигуни. У відносно невеликому числі промислових установок використовується гідروпривід, ще рідше - пневмопривод.

Настільки широке, практично повсюдне поширення електропривода обумовлене особливостями електричної енергії - можливістю пересувати її на будь-які відстані, постійною готовністю до використання, легкістю перетворення в будь-які інші види енергії.

Сьогодні в приладових системах використовуються електроприводи, потужність яких складає одиниці мікроват; потужність електропривода компресора на перекачувальний газ станції - десятки мегават, тобто діапазон сучасних електроприводів по потужності перевищує 10^{12} . Такого ж порядку й діапазон по частоті обертання: в установці, де витягаються кристали напівпровідників, вал двигуна повинен робити 1 оберт у кілька десятків годин при дуже

жорстких вимогах до рівномірності руху; частота обертання шліфувального кола в сучасному гарному верстаті може досягати 150000 об/хв.

Але особливо широкий - безмежно широкий - діапазон застосувань сучасного електропривода: від штучного серця до крокуючого екскаватора, від вентилятора до антени радіотелескопа, від пральної машини до гнучкої виробничої системи. **Саме ця особливість - найтісніша взаємодія з технологічною сферою - надавала й надає на електроприводу могутній стимулюючий вплив.** Безупинно зростаючі вимоги з боку технологічних установок обумовлюють розвиток електропривода, удосконалювання його елементарної бази, його методології. У свою чергу розвиток електроприводу позитивно впливає на технологічну сферу, забезпечує нові, недоступні раніше можливості.

З енергетичної точки зору електропривод - *головний споживач електричної енергії*: сьогодні в розвинених країнах він споживає більше 60% всієї виробленої електроенергії. В умовах дефіциту енергетичних ресурсів це робить особливо гострою проблему енергозбереження в електроприводі й засобами електропривода.

Фахівці вважають, що сьогодні заощадити одиницю енергетичних ресурсів, наприклад 1т умовного палива, удвічі дешевше, ніж її добути. Неважко бачити, що в перспективі це співвідношення буде змінюватися: добувати паливо стає усе сутужніше, а запаси його всі убувають.

13.2. Загальні відомості про електричні машини.

Перший електропривод у Росії розробив академік В. С. Якобі. У 1838 р. електродвигун змонтували на човні, що зумовило появу першого в світі електрохода. Моторний човен Якобі з 12—14 пасажирами, використовуючи як джерело електричної енергії батарею сухих елементів, розвивав проти течії на Неві середню швидкість 4 км/год. Спочатку потужність електродвигуна становила 550—736 Вт, а після вдосконалень (1839 р.) підвищилась у 3—4 рази. Висока вартість та мала потужність електричних джерел живлення були основними причинами того, що електроходи тоді не дістали широкого застосування. Для підтвердження цього достатньо сказати, що в той час 1 кВт • год. електричної енергії коштувала приблизно у 12 разів більше, ніж парова енергія. Практика вимагала більш економічних і потужних джерел електроенергії. Такими джерелами стали електричні генератори. Перший патент на електричний генератор з кільцевим якорем одержав у 1870 р. З. Грамм. Це поклало початок поширенню промислових електрогенераторів і електроприводів.

Коротко розглянемо історію розвитку електропривода в Росії. ***У 1882 р. В. Н. Чиколєв***, засновник журналу «Электричество» (1880 р.), розробив електропривод для швейної машини, а ***в 1886 р.***— для вентилятора. Обидві конструкції електроприводів були удостоєні Золотих медалей на Всеросійських виставках. ***У 1890—1894 рр. перші електроприводи*** було встановлено на кораблях військово-морського флоту для повертання гарматних башт, рульових пристроїв, підйомників боєзарядів. Використання електроприводів на кораблях військово-морського флоту дало імпульс для їх промислового виготовлення. ***У 1892 р електроприводи вперше було встановлено на міському транспорті (трамвай у м Києві).*** Пізніше трамваї з електроприводами почали експлуатуватись в інших містах — Казані, Нижньому Новгороді, Москві (1903 р.), Петербурзі (1907 р.). В 1896 р. на підмосковних текстильних фабриках уже використовували електроприводи з двигунами постійного струму.

Для перших електроприводів властивим було використання двигунів постійного струму з редукторами та ручним керуванням комутаційними пристроями. На I Всеросійському електротехнічному з'їзді у Петербурзі в 1900 р. говорилось про використання електроприводів потужністю 4,4 і 6,6 кВт для поршневих насосів на Зирянівському руднику (Алтай).

Перші шахтні підйомні установки, вентилятори, насоси з електроприводами почали використовувати на Донбасі ще в 1910 р., а в 1912 р. потужність електроустановок на шахтах Донбасу досягла 30 МВт.

Особливо швидкими темпами почав розвиватися електропривод з появою техніки використання **трифазного змінного струму**, розробленої М. О. Доліво-Добровольським (1889 р.). Прості, надійні та економічні асинхронні електродвигуни з короткозамкнутим ротором визначили необхідні умови для більш широкого використання їх у промисловості. В 1893 р. у Росії працювало 209 асинхронних електродвигунів сумарною потужністю 1,5 МВт. Винахід П. Н. Яблочковим і Н. Ф. Усагіним трансформаторів дав змогу вирішити проблему передачі електроенергії на великі відстані і сприяв розвитку електроприводів з двигунами змінного струму.

Поряд з виникненням промислових електроприводів, розвивалися теоретичні основи їх роботи. Ґрунтовною працею в цій області була праця **Д. А. Лачинова «Електромеханічна робота», опублікована в 1880 р.** У цій праці було дано класифікацію електричних машин постійного струму за системами збудження, математичні вирази механічних характеристик, досліджено питання живлення електродвигуна від автономного генератора.

Крім вирішення інженерних і наукових питань, дуже важливою умовою розвитку електропривода була підготовка інженерів-електротехніків, вперше розпочата в Електротехнічному інституті у Петербурзі в 1892 р. У цьому ж році в Харківському технологічному інституті було введено курс електротехніки. Подібний курс почали викладати в 1893 р. також у Петербурзькому гірничому інституті, а з 1901 р. у Петербурзькому і Київському політехнічних інститутах. Перший на Україні електротехнічний факультет було відкрито в Київському політехнічному інституті у 1918 р.

Важлива роль у розвитку електропривода та його автоматизації належить Харківському електромеханічному заводу (ХЕМЗ), заводське бюро досліджень якого переросло в центральну заводську лабораторію, а потім у великий науково-дослідний інститут. Перший етап розвитку електропривода визначався протистоянням двох тенденцій — використанням трансмісійної чи одиночної систем електропривода. При трансмісійній системі електропривод приводив у дію єдину для групи механізмів трансмісію, від якої механічна енергія передавалась до окремих робочих машин (механізмів); при одиночній (індивідуальній) системі електропривода кожна робоча машина або механізм приводились у дію окремим електродвигуном. До початку 20-х років нашого століття одиночний електропривод в основному витіснив трансмісійну систему, основні недоліки якої полягали у великих габаритних розмірах, низьких ККД і надійності; труднощах експлуатації і регулювання режимів роботи окремих об'єктів тощо.

На першому етапі розвитку електропривода при оцінці його ефективності основна увага приділялась вартості самого електропривода і енергії його живлення. Такі важливі фактори як можливість інтенсифікації промислових процесів на його основі та поліпшення їх якісних характеристик не враховувались. Осмислення цих найважливіших переваг електропривода дало могутній поштовх для електрифікації промисловості, різкого поширення сфери використання електропривода як в Росії, так і за кордоном. *Так, сумарна потужність електродвигунів у СІІІА в 1909 р. становила 25,9 % сумарної потужності всіх двигунів країни, а в 1925 р. їх частка вже досягла 70 %. Подібна тенденція мала місце також в Англії і Німеччині у 1927 р. У 1936 р. сумарна потужність електродвигунів у колишньому СРСР досягла 82 % потужності всіх двигунів.*

З розвитком одиночного електропривода та збільшенням потужності електродвигунів виникла тенденція розвитку також багатодвигунного електропривода, при якому на одній робочій машині розміщувалось кілька двигунів для приведення в дію різних елементів машини, наприклад двигуни подачі та різання у верстатах, вуглевидобувних машинах, індивідуальні приводи рольгангів прокатних станів тощо. Використання індивідуальних

двигунів дало змогу спростити конструкцію механізмів, поліпшити їх надійність і техніко-економічні показники, а іноді й оптимізувати керування технологічними процесами.

На початку 20-х років нашого століття у промисловості країни використовували як правило імпортні електродвигуни та електроапаратуру, і лише в кінці 20-х та на початку 30-х років почали серійно випускати вітчизняні електроприводи (для конвейєрів, лебідок тощо). На початку 30-х років на Харківському електромеханічному заводі (ХЕМЗ) почали виготовляти пристрої для дистанційного (кнопкового) керування електроприводами, що стало основою наступного етапу розвитку електропривода — його автоматизації. Так, у 1932 р. ХЕМЗ виготовив релейно-контакторну апаратуру для реверсивного електропривода блюмінга потужністю 5,14 МВт, яка дала змогу автоматизувати процес керування. З 1934 р. вітчизняні магнітні пускачі для дистанційного керування виготовляли у комплекті з шахтними вибійними механізмами.

Починаючи з 30-х років, у колишньому СРСР почався масовий випуск металорізальних верстатів з багатодвигунними електроприводами і релейно-контакторною апаратурою керування. Тоді ж з'являються перші копіювальні верстати, автоматизовані на основі принципу керування за відхиленням, реалізованого за допомогою замкнутих систем автоматичного керування із зворотним зв'язком (системи автоматичного регулювання). Замкнуті системи автоматичного керування в 30-х роках отримують все більший розвиток. У довоєнні роки основна увага приділялась розвитку автоматизованого електропривода у важкій промисловості — металургійній, гірничій, а також у машинобудівній. Досить швидкими темпами розвивалась елементна база (безконтактні сельсини). У 1936 р. було виготовлено першу вітчизняну підйомну машину з редукторним електроприводом постійного струму за системою генератор - двигун (Г-Д) з контакторним керуванням. Для металургійної промисловості розробляли малоінерційні іонні електроприводи великої потужності.

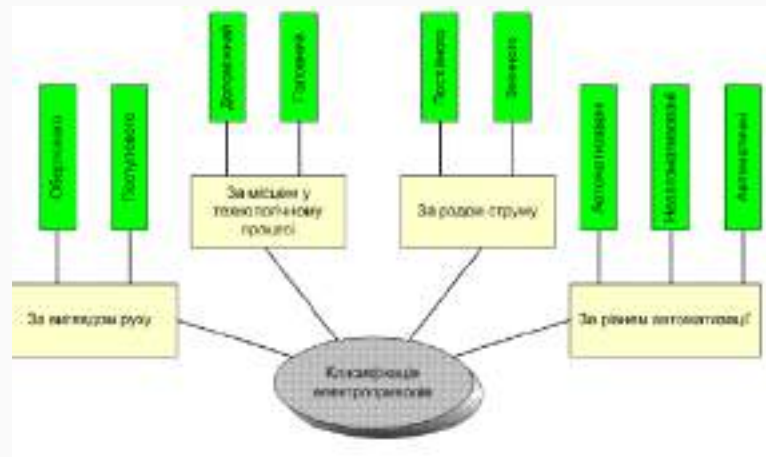
У другій половині 30-х років з'явилися автоматизовані електроприводи з асинхронними двигунами великої потужності для шахтних підйомних машин. На ХЕМЗ і було розроблено схеми й апаратуру автоматизованого пуску асинхронних електроприводів у функції струму і прискорення. В 1937 р. за Ф. І. Бутаєвим і М. В. Мартиновим було закріплено авторство на систему керування генератором постійного струму з декількома обмотками керування, що сприяло розвитку різних електромашинних підсилювачів (ЕМП). Використання ЕМП в автоматизованому електроприводі в багатьох випадках давало змогу замінити великогабаритні релейно-контакторні схеми більш надійними, дістати потрібні характеристики при плавній зміні швидкості. Було розроблено системи електропривода з ЕМП з двокаскадними підсилювачами. ЕМП все більше використовувались у електроприводах підйомних машин, блюмінгів, екскаваторів тощо. Потужність серійних ЕМП постійно зростала і досягала десятків кіловат. ЕМП застосовувались також в електроприводах змінного струму (для електродинамічного гальмування). Винахід і поширення ЕМП сприяли появі в автоматизованому електроприводі періоду електромашинної автоматики як нового ступеня його розвитку.

Велика Вітчизняна війна внесла корективи у розвиток електропривода як для потреб фронту, так і в наступний період відбудови народного господарства країни. У багатоплановому розвитку електропривода в цей і наступні періоди можна зазначити такі основні напрямки:

- постійне розширення сфери використання електропривода;
- збільшення сумарної потужності електроприводів і потужності окремих установок;
- розширення галузей використання регульованих електроприводів
- розвиток і вдосконалення елементної бази автоматизованого електропривода;
- розробка і розвиток теорії автоматизованого електропривода та зростання наукового і технічного рівня;
- розвиток електропривода як підсистеми автоматизованого керування технологічними процесами;

- розробка нових конструкцій електромеханічних перетворювачів (електродвигунів), підвищення їх надійності та техніко-економічних показників;
 - поліпшення підготовки інженерних і наукових кадрів для обслуговування автоматизованого електропривода.

З однієї сторони електроприводи можна класифікувати, як :



З іншої :

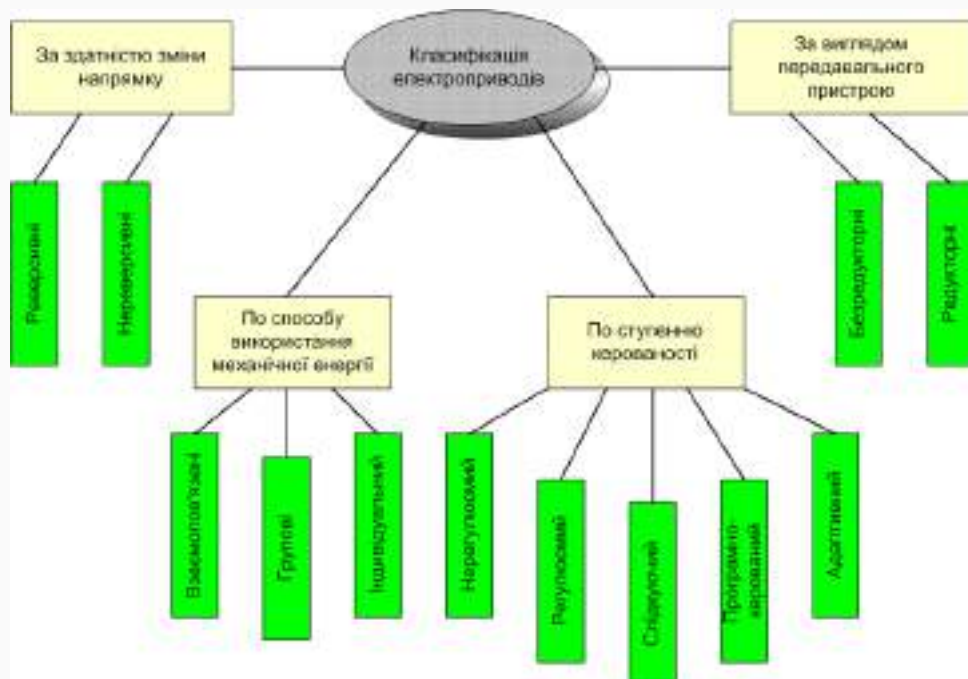


Рис. 1.2 Класифікація електроприводів

14. ТЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОД ДПС. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ ДПС З НЕЗАЛЕЖНИМ (ПАРАЛЕЛЬНИМ) ТА ПОСЛІДОВНИМ ЗБУДЖЕННЯМ.

14.1. Основні рівняння

Для одержання найпростішої моделі електропривода постійного струму, що описує сталі (статичні) режими й що дозволяє отримати основні характеристики, скористаємося схемою на рис. 3.1.

Будемо думати, що якірний ланцюг живиться від незалежного джерела з напругою U^* , опір ланцюга якоря R постійний, магнітний потік Φ визначається лише струмом збудження й не залежить від навантаження (реакція якоря не проявляється), індуктивні параметри ланцюгів поки не враховуються, оскільки розглядаються лише сталі (статичні) режими.

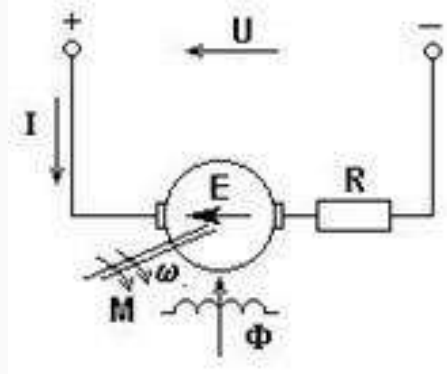


Рис. 3.1. Схема електропривода із двигуном постійного струму

Взаємодія струму I в обмотці якоря з магнітним потоком Φ , створюваним обмотками, розташованими на полюсах машини, приводить відповідно до закону Ампера й виникненню електромагнітних сил, що діють на активні провідники обмотки й, отже, електромагнітного моменту M :

$$M = k\Phi \quad (3.1)$$

де k - конструктивний параметр машини.

У провідниках обмотки якоря, що рухаються з кутовою швидкістю ω в магнітному полі під дією моменту M , відповідно до закону Фарадея наводиться ЕРС обертання E :

$$E = k\Phi\omega, \quad (3.2)$$

спрямована в розглянутому випадку зустрічно стосовно причини, що викликала рух, - ЕРС джерела харчування U .

В відповідність із другим законом Кирхгофа для якірного ланцюга машини справедливе рівняння:

$$U - E = IR. \quad (3.3)$$

Рівняння (3.1)-(3.3) - найпростіа, але достатня для розуміння головних процесів в електроприводі постійного струму модель. Для рішення практичних завдань вони повинні бути доповнені рівнянням руху з моментом втрат ΔM , що входять у M_c ,

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$$

і рівняннями ланцюга збудження для конкретної схеми електропривода.

Зрозуміло, в умовах кожного завдання повинне бути строго обговорено, що задано й відомо, а що потрібно знайти.

Розглянемо докладніше роль, що грає ЕРС E в процесі перетворення енергії, здійснюваному електричною машиною. Якщо існував деякий сталий режим $M_1 = M_{c1}$, а потім M_c змінився, наприклад, зріс до величини M_{c2} , то для одержання нового сталого режиму необхідно мати засіб, що змінив б M , привівши його у відповідність із новим значенням M_c . У двигуні внутрішнього згоряння цю роль виконає оператор, збільшивши подачу палива; у паровій турбіні - спеціальний регулятор, що збільшить подачу пари. В електричній машині цю роль виконає ЕРС. Дійсно, при зростанні M_c швидкість двигуна почне знижуватися, значить зменшиться відповідно до (3.2) і ЕРС (думаємо для простоти, що Φ , а також U і R - постійні). З (3.3) треба, що

$$I = \frac{U - E}{R},$$

отже, струм виросте, обумовивши тим самим ріст моменту відповідно до (3.1). Двигун автоматично, без яких-небудь зовнішніх впливів перейде в новий сталий стан. Ці процеси будуть мати місце при будь-яких величинах і знаках M_c , тобто ЕРС буде виконувати функцію регулятора як у руховому, так і в гальмових режимах роботи машини.

14.2. Характеристики й режими при незалежному збудженні, $U = \text{const}$

При використанні в електроприводі постійного струму двигуна з незалежним збудженням - рис. 3.2 з живленням від джерела напруги $U = \text{const}$ рівняння *електромеханічної характеристики* $\omega(I)$ вийде підстановкою (3.2) в (3.3) і рішенням відносно ω :

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} \quad (3.4)$$

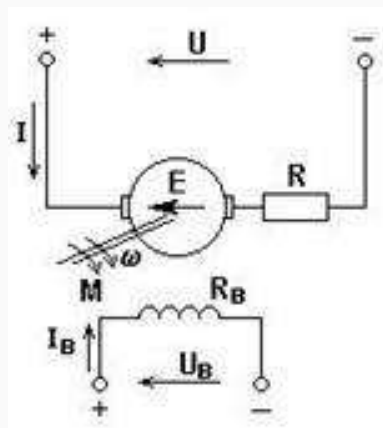


Рис. 3.2. Схема двигуна постійного струму незалежного порушення

Механічну характеристику $\omega(M)$ отримаємо, підставивши в (3.4) струм, виражений з (3.1):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2}. \quad (3.5)$$

При заданих U , Φ і R рівняння (3.4) і (3.5) однозначно визначають зв'язок між ω , I і M у будь-яких режимах. Характеристики $\omega(M)$ й $\omega(I)$ це прямі лінії, що проходять через дві характерні точки: $M = 0$, це прямі лінії, що проходять через дві характерні точки: $M = 0$, $\omega = \omega_0$ і $\omega = 0$, $I = I_{k3}$, $M = M_{k3}$; при $\Phi = \text{const}$ вони розрізняються лише масштабами по осі абсцис.

Швидкість $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ (рис. 3.3) відповідає режиму ідеального холостого ходу : $M = 0$, $E = U$ і спрямовані зустрічно.

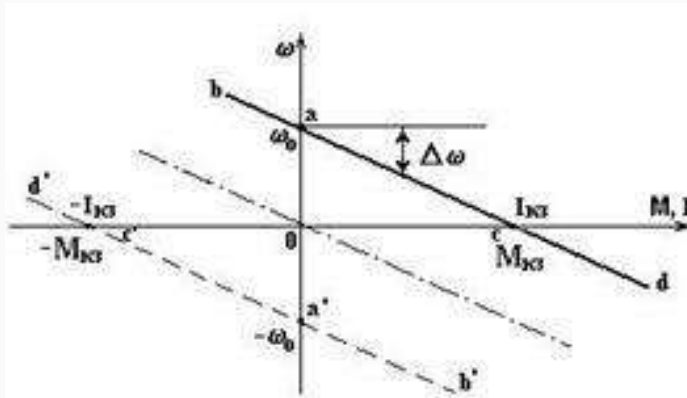


Рис. 3.3. Механічні (електромеханічні) характеристики електропривода постійного струму незалежного збудження при $U = \text{const}$

$$\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$$

Величина $\Delta\omega$ - перепад швидкості під впливом навантаження.

Збільшенням навантаження за певних умов, які розглядаються нижче, можна прийти

до режиму короткого замикання : $\omega = 0$, $I = \frac{U}{R} = I_{кз}$, $M = k\Phi I_{кз} = M_{кз}$.

При зміні полярності U характеристика займе положення, показане на рис. 3.3 пунктиром. Ділянки характеристики між ω_0 і $M_{кз}$, де знаки ω і M збігаються, відповідають, як було домовлено раніше, руховому режиму роботи; ділянки з різними знаками ω й M - гальмовим режимам.

Гальмові режими - це генераторні режими, оскільки механічна енергія, що надійшла з вала машини, перетвориться в електричну й передається через електричні затискачі машини. Залежно від того, куди надходить електрична енергія, розрізняють три гальмових режими.

а) Гальмування з віддачею енергії в мережу (рекуперативне) або генераторний режим роботи паралельно з мережею

Якщо якорь двигуна обертати від деякого стороннього джерела зі швидкістю, що перевищує швидкість ідеального холостого ходу, то ЕРС двигуна буде більше прикладеної напруги, у результаті чого струм у якорі двигуна й момент змінять свій знак. Механічна енергія, що надходить при цьому на вал двигуна, перетвориться в електричну й за винятком втрат у двигуні рекуперується в мережу.

На механічних характеристиках гальмуванню з віддачею енергії в мережу відповідають ділянки ab і $a'b'$ (рис. 3.3)

б) Гальмування противмикання або генераторний режим роботи послідовно з мережею

У режимі противмикання змінює знак швидкість двигуна при збереженні знака моменту або знак моменту двигуна при збереженні знака швидкості.

Перший випадок має місце при впливі активного моменту статичного навантаження, що перевищує момент короткого замикання на даній характеристиці.

У результаті зміни знака швидкості ЕРС двигуна буде збігатися із прикладеною напругою, і струм у якорі визначиться виразом:

$$I = \frac{U + E}{R}$$

Другий випадок використовується для зупинки двигуна шляхом зміни полярності напруги, що підводиться до його якоря.

Внаслідок механічної інерції швидкість двигуна й ЕРС у початковий момент зберігаються незмінними, а струм буде дорівнює:

$$I = \frac{-U - E}{R}$$

На механічних характеристиках (рис. 3.3) гальмування противмикання відповідають ділянки cd і $c'd'$.

У режимі гальмування противовмиканням енергія надходить у привод і з боку механізму, і від мережі й розсіюється в опорах якорного ланцюга; у попередньому випадку енергія, що надходить від механізму, передавалася в мережу.

в) Динамічне гальмування або генераторний режим роботи незалежно від мережі

Якщо якорний ланцюг відключений від джерела живлення й замкнутий на зовнішній резистор, то при обертанні двигуна від зовнішнього джерела або по інерції в якорному

$$I = -\frac{E}{R}$$

ланцюзі індукуються ЕРС і протікає струм, що створює момент. Характеристики проходять через початок координат - штрих-пунктир на рис. 3.3.

14.3. Характеристики й режими при незалежному збудженні, $I = \text{const}$

У ряді застосувань якорний ланцюг двигуна постійного струму незалежного збудження живиться не від джерела напруги, як у попередньому випадку, а від джерела струму ($I = \text{const}$) - рис. 3.4. При цьому, природно, зберігають силу фундаментальні співвідношення (3.1)-(3.3), однак властивості електропривода радикально змінюються.

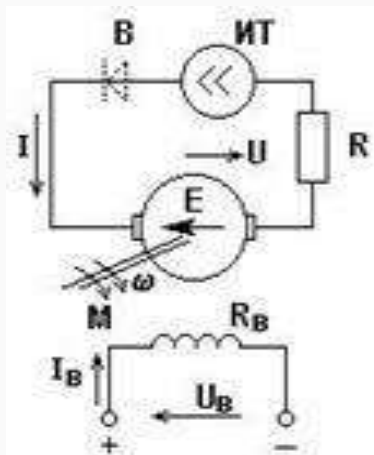


Рис. 3.4. Схема двигуна постійного струму незалежного збудження при живленні від джерела струму

Електромеханічна $\omega(I)$ й механічна $\omega(M)$ механічна $\omega(M)$ характеристики представлені тепер вертикальними прямими (рис. 3.5)

$$I = \text{const} \quad (3.6)$$

$$M = k\phi = \text{const} \quad (3.7)$$

і привод здобуває нову властивість “джерела моменту”. Це пов'язане з тим, що джерело живлення - джерело струму - нейтралізує дію ЕРС, воно тепер уже не грає ролі внутрішнього регулятора й не впливає на швидкість. У свою чергу, напругу U стає залежною змінною

$$U = E + IR = k\phi\omega + IR, \quad (3.8)$$

і характеристика $\omega(U)$ (рис. 3.5) визначає енергетичні режими роботи електропривода.

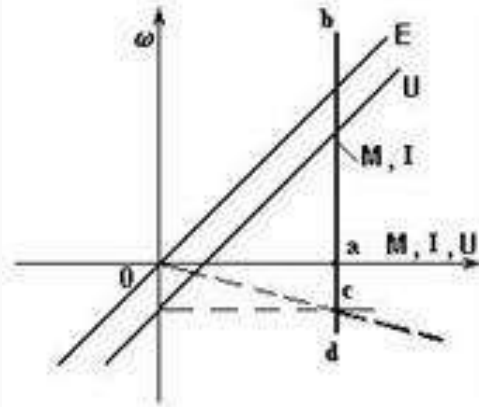


Рис. 3.5. Характеристики електропривода при живленні якоря від джерела струму

Режиму ідеального холостого ходу немає в розглянутій структурі - “джерело моменту”. Руховий режим відповідає ділянці ab в I квадранті: $M\omega > 0$, тобто механічна енергія надходить до споживача - технологічній машині, $UI > 0$ - електрична енергія надходить до свого споживача - двигуна.

Режим короткого замикання - точка a , тут $E = 0$ і $U = IR$.

На ділянці ac $M\omega < 0$, тобто механічна енергія надходить від технологічної машини й, перетворюючись в електричну, передається в якірний ланцюг; як і раніше $IU > 0$ - електрична енергія від джерела струму також надходить у якірний ланцюг. Цей режим ми визначили раніше як гальмування противмиканням.

У точці з $U = 0$ - режим динамічного гальмування: вся механічна енергія, що надійшла, розсіюється в опорах якірного ланцюга.

І, нарешті, на ділянці cd $M\omega < 0$ і $UI < 0$ - рекупераційне гальмування, якщо джерело струму дозволяє передати енергію в мережу. Якщо джерело струму має однобічну провідність (пунктир на рис. 3.4) цього режиму не буде, і електропривод буде продовжувати працювати в режимі динамічного гальмування (пунктир на рис. 3.5).

14.4. Характеристики й режими при послідовному збудженні

В електроприводах постійного струму іноді використовуються двигуни з послідовним збудженням, коли спеціально виконана обмотка збудження включена послідовно з обмоткою якоря – рис. 3.6

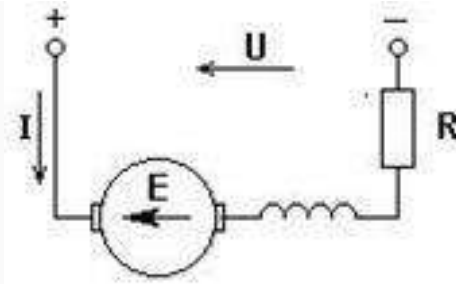


Рис. 3.6. Схема двигуна постійного струму послідовного збудження

Для двигуна послідовного збудження, як і для інших двигунів постійного струму при живленні якоря від джерела напруги ($U = \text{const}$), справедливі рівняння (3.4) і (3.5), однак, якщо для двигуна незалежного збудження потік не залежить від струму навантаження, то для двигуна послідовного збудження потік є функцією струму навантаження.

Залежність $\Phi = \phi(I)$ – характеристика намагнічування – не має простого аналітичного вираження, її зразковий вид зображений на рис. 3.7.

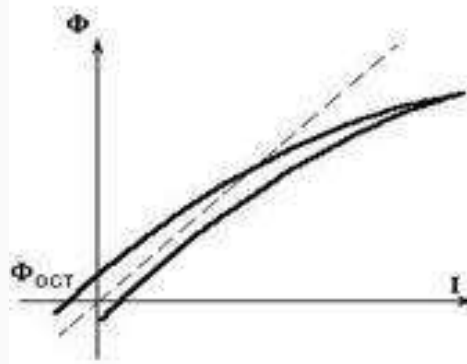


Рис. 3.7. Характеристика намагнічування машини постійного струму

У першому наближенні залежність між швидкістю двигуна й моментом, що розвивають їм, у сталому режимі можна знайти в припущенні, що потік збудження й струм у якорі двигуна зв'язані між собою лінійною залежністю (пунктир на рис. 3.7):

$$\begin{aligned} \Phi &= \alpha I \\ \Phi &= \alpha I \end{aligned} \quad \text{Тоді}$$

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha},$$

а оскільки

$$M = k\phi = k\alpha I^2,$$

то

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha}.$$

Таким чином, при зробленому допущенні механічна характеристика двигуна послідовного збудження зображується гіперболою (рис. 3.8); однієї з її асимптот є вісь ординат, а іншої — пряма, паралельна осі абсцис,

$$\omega = -\frac{R}{k\alpha}.$$

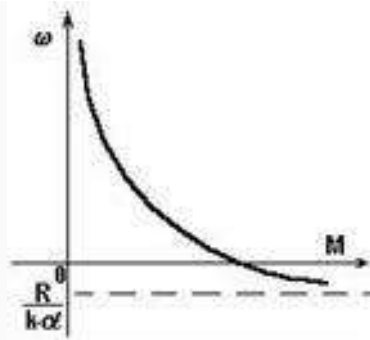


Рис. 3.8. Механічна характеристика двигуна послідовного збудження

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}$$

Жорсткість механічної характеристики $\beta = \frac{dM}{d\omega}$ двигуна послідовного збудження перемінна й зростає зі збільшенням навантаження.

Отримані рівняння дають лише загальне уявлення про характеристики електропривода із двигуном послідовного збудження, тому що в дійсності магнітна система машини насичена й крива намагнічування досить далека від прямої. Тому в практичних цілях звичайно користуються універсальними характеристиками для серії машин —рис. 3.9, побудованими у

відносних величинах $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_H}, I^* = \frac{I}{I_H}$ і $M^* = \frac{M}{M_H}$; ω_H , I_H і M_H —номінальні величини двигуна, $R_{\text{дод}} = 0$.

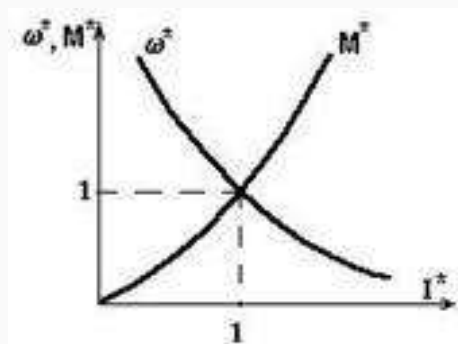


Рис. 3.9. Характеристики двигуна послідовного збудження в відносних величинах

Електропривод із двигунами послідовного збудження в нормальній схемі ($U = \text{const}$) може працювати в тих же енергетичних режимах, що й привод із двигунами незалежного порушення, за винятком режиму ідеального холостого ходу й генераторного режиму паралельно з мережею (рекуперативне гальмування), оскільки при навантаженні, що прагне до нуля, до нуля прагне й магнітний потік, вісь ω - асимптот механічної характеристики.

Деякі особливості при послідовному збудженні має режим динамічного гальмування. Якщо якорь обертової машини відключити від джерела напруги й замкнути на зовнішній резистор (рис. 3.10, схема ліворуч), то під дією потоку залишкового магнетизму ($\Phi_{\text{ост}}$ на рис. 3.7) у провідниках якоря виникає деяка ЕРС $E_{\text{ост}}$, що спричинить в замкнутому ланцюзі струм. Цей струм, протікаючи по обмотці збудження у зворотному проти вихідного напрямку розмагнітить машину ($\Phi = 0$) і гальмового моменту створено не буде.

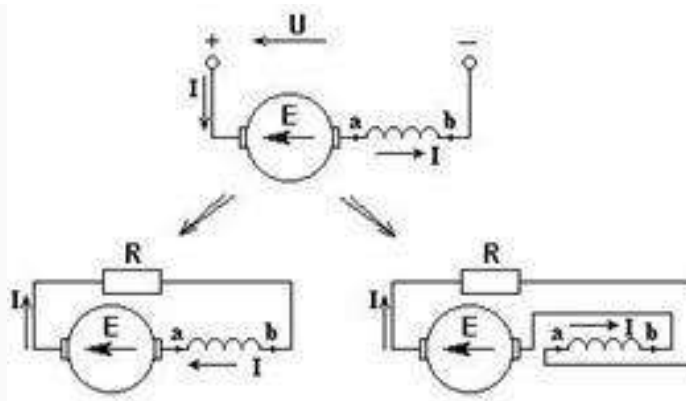


Рис. 3.10. До режиму динамічного гальмування із самозбудженням

Для того, щоб отримати гальмовий момент, струм, створений $E_{ост}$, повинен протікати в тім же, що й раніше, напрямку, підсилюючи магнітний потік, тобто створюючи самозбудження. Ця умова виконається, якщо при переході на режим гальмування переключити обмотку збудження як показано на рис. 3.10, схема праворуч.

Струм, створюваний ЕРС, що збільшується, змінить знак, момент буде спрямований проти руху, тобто стане гальмовим.

Робота машини постійного струму із самозбудженням можлива лише за певних умов, а саме при таких значеннях швидкості й опору R ланцюга якоря, щоб мало місце рівність

$$E = IR, \quad (3.11)$$

Існуванню цієї рівності відповідає наявність точки перетинання кривих $E = \varphi(I)$ (при даній швидкості) і прямої $IR = f(I)$ —рис. 3.11. Очевидно, що чим більше R , тим при більшій швидкості відбудеться самозбудження машини.

Найменша швидкість, при якій машина може самозбуджуватися, буде при $R_{дод} = 0$, тобто при замкнутій накоротко якорному ланцюгу машини.

Побудування характеристики в режимі динамічного гальмування при самозбудженні можна зробити, виходячи з рівняння балансу потужностей.

Потужність, що розвиває двигуном у режимі динамічного гальмування, цілком розсіюється в опорах якорного контуру, тобто $(-I)^2 R = -M\omega$, звідки

$$\omega = -\frac{I^2 R}{M} \quad (3.12)$$

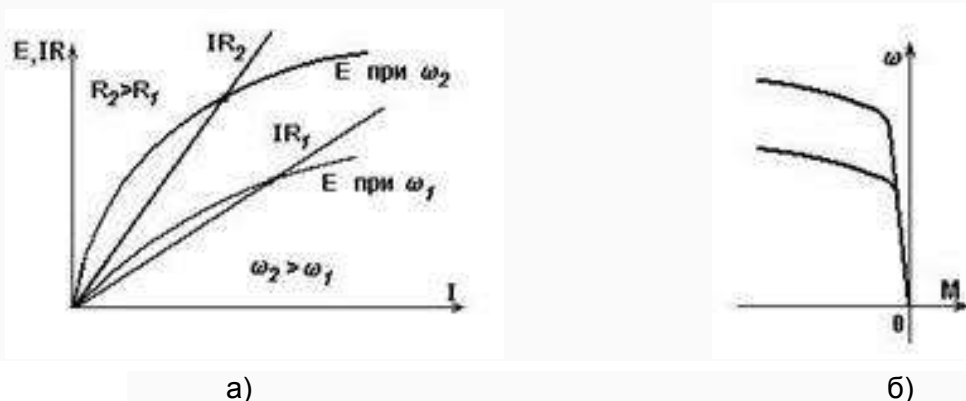


Рис. 3.11. Характеристики динамічного гальмування з самозбудженням

Знаючи R і задаючись струмом I , по універсальній характеристиці визначають відповідному цьому струму момент M , обчислюють швидкість ω і т.д. Характер залежності $\omega(M)$ в гальмовому режимі при самозбудженні зображений на рис. 3.11,б.

В електроприводах постійного струму іноді використовуються двигуни змішаного збудження, що мають дві обмотки збудження, одна йз яких включена послідовно в яірний ланцюг, а інша має незалежне живлення.

Двигуни послідовного збудження можуть отримувати живлення не тільки від джерела напруги, щ76 обулорозглянуто вище, але й від джерела струму. Оскільки при цьому магнітний потік буде незмінним, зберігаються й основні властивості електропривода, розглянуті раніше.

15. ТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДПС НЗ

15.1. Прості моделі асинхронного електропривода

Принцип дії асинхронної машини в самому загальному виді полягає в наступному: один з елементів машини - статор використовується для створення магнітного поля, що рухається з певною швидкістю, а в замкнутих провідних пасивних контурах іншого елемента - ротора наводяться ЕРС, що викликають протікання струмів і утворення сил (моментів) при їхній взаємодії з магнітним полем. Всі ці явища мають місце при несинхронному - асинхронному русі ротора відносно поля, що й дало машинам такого типу назва - асинхронні.

Статор звичайно виконаний у вигляді декількох розташованих у пазах котушок, а ротор - у вигляді "білячої клітки" (короткозамкнений ротор) або у вигляді декількох котушок (фазний ротор), які з'єднані між собою, виведені на кільця, розташовані на валу, і за допомогою ковзних по них щіток можуть бути замкнуті на зовнішні резистори.

Незважаючи на простоту фізичних явищ і реалізуючих їх конструктивів повний математичний опис процесів в асинхронній машині досить складний:

по-перше, всі напруги, струми, потокозчкплення - змінні, тобто характеризуються частотою, амплітудою, фазою або відповідними векторними величинами;

по-друге, взаємодіють контури, що рухаються, взаємне розташування яких змінюється в просторі;

по-третє, магнітний потік нелінійно пов'язаний зі струмом, що намагнічує (проявляється насичення магнітного ланцюга), активні опори роторного ланцюга залежать від частоти (ефект витиснення струму), опори всіх ланцюгів залежать від температури й т.п.

Розглянемо найпростішу модель асинхронної машини, придатну для пояснення основних явищ в асинхронному електроприводі.

Принцип одержання *двигунного* магнітного поля

Нехай на статорі розташований виток (катушка) А-Х (рис. 4.1,а,б), по якому протікає змінний струм $i = I_m \sin \omega t$; $\omega = 2\pi f_1$. МРС F_A , створена цим струмом, буде пульсувати по осі витка

$$F_A = F_m \sin \omega t$$

(горизонтальні штрихові стрілки на рис. 4.1,в). Якщо додати виток (катушку) В-У, розташований під кутом 90° до А-Х, і пропускати по ньому струм $i = I_m \cos \omega t$, то МРС F_B буде пульсувати по осі цього витка (вертикальні стрілки):

$$F_B = F_m \cos \omega t.$$

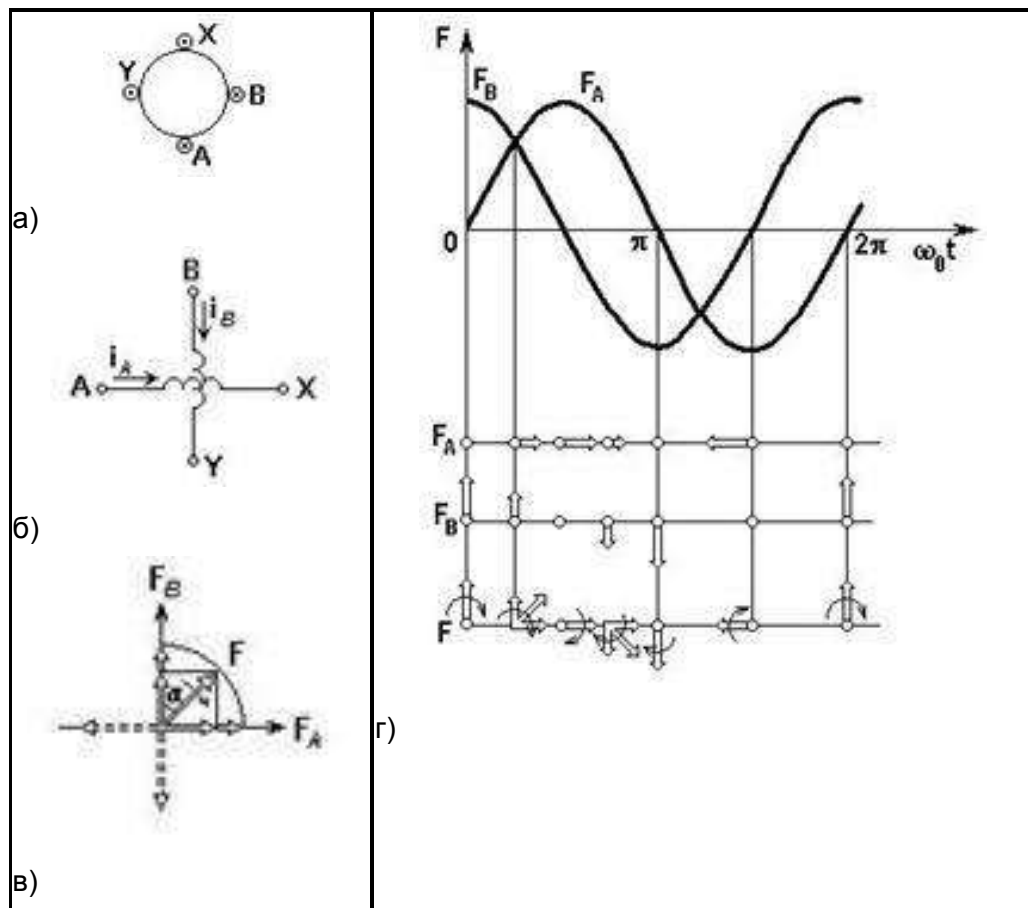


Рис. 4.1. До утворення обертового магнітного поля в машині
Вектор результуючої МРС має модуль

$$F = \sqrt{F_A^2 + F_B^2} = F_m = \text{const.}$$

Його фаза (визначиться з умови

$$\text{tg} \alpha = \frac{F_A}{F_B} = \text{tg} \omega t$$

Таким чином, вектор результуючої МДС при прийнятих умовах, тобто при зрушенні двох витків у просторі в $\frac{\pi}{2}$ і при зрушенні струмів у часі на $\frac{\pi}{2}$ і при зрушенні струмів у часі на $\frac{\pi}{2}$, обертається з кутовою швидкістю, обертається з кутовою швидкістю $\omega = 2\pi f_1$, де f_1 - частота струмів у витках.

У загальному випадку для машини, що має p пару полюсів ($p=1,2,3\dots$), синхронна кутова швидкість ω_0 , рад/с, тобто швидкість поля, визначиться як

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} ; (4.1)$$

для частоти обертання n_0 , об/хв, будемо мати:

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} , (4.2)$$

т. є. при живленні від мережі $f_1=50\text{Гц}$ синхронна частота обертання може бути 3000, 1500, 1000, 750, 600... про/хв залежно від конструкції машини.

Вирази (4.1) і (4.2) мають принциповий характер: вони показують, що для даної машини є лише одна можливість змінювати швидкість поля - змінювати частоту джерела живлення f_1 .

Процеси при $\omega = \omega_0$

Нехай ротор обертається зі швидкістю ω_0 , тобто його обмотки не перетинають силових ліній магнітного поля й він не робить істотного впливу на процеси.

У досить грубому, але іноді корисному наближенні можна представити обмотку фази статора

як деяку ідеальну котушку, до якої прикладене змінна напруга $u_1 = U_m \sin \omega t$. Ми будемо далі або позначати його й інші синусоїдальні змінні відповідними заголовними буквами, якщо інтерес представляють лише їхні діючі значення, або будемо додавати крапку вгорі, показуючи тим самим, що мова йде про часовий вектор, що має амплітуду. Ми будемо далі або позначати його й інші синусоїдальні змінні відповідними заголовними буквами, якщо інтерес представляють лише їхні діючі значення, або будемо додавати крапку вгорі, показуючи тим самим, що мова йде про часовий вектор, що має амплітуду $U_m = \sqrt{2}U$ й фазу φ .

Очевидно, що прикладена напруга $\dot{U}_1$ зрівноважується ЕРС самоіндукції зрівноважується ЕРС самоіндукції $\dot{E}_1$ (рис. 4.2, а, б)

$$E_1 = 4,44 \Phi f_1 w_1 k_{\phi} \quad (4.3)$$

де w - число витків обмотки; k_{ϕ} - коефіцієнт, що залежить від конкретного виконання обмотки.

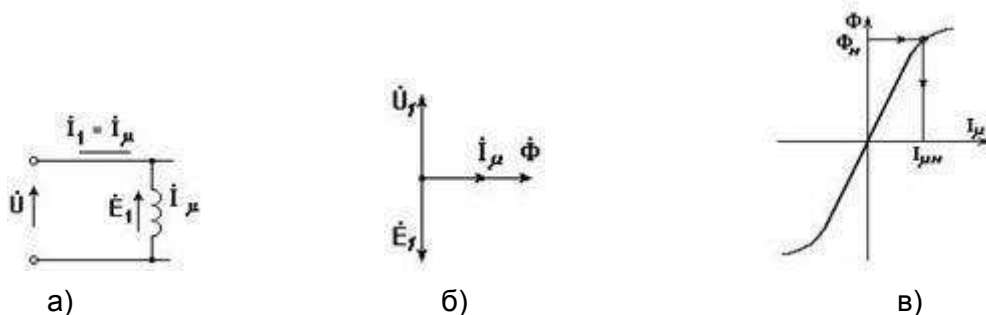


Рис. 4.2. Ідеалізована модель асинхронної машини при $\omega = \omega_0$ (а), векторна діаграма (б) і крива намагнічування (в)

Можна приблизно вважати, що магнітний потік визначається прикладеною напругою, частотою й параметрами обмотки:

$$\Phi \approx \frac{U_1}{4,44 f_1 w_1 k_{\phi}} \equiv \frac{U_1}{f_1} \quad (4.4)$$

Струм в обмотці (фазі) статора - струм намагнічування визначиться при цьому лише магнітним потоком і характеристикою намагнічування машини (рис. 4.2, в):

$$I_1 = I_{10} = I_m$$

У серійних машинах при $U_1=U_{1н}$ и $f_1=f_{1н}$, тобто при номінальному магнітному потоці струм холостого ходу I_{10} становить звичайно 30% - 40% від номінального струму статора $I_{1н}$.

Процеси під навантаженням

При навантаженні вала $\omega \neq \omega_0$; відмінність швидкостей ω і ω_0 прийнято характеризувати ковзанням

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (4.5)$$

Тепер у роторному ланцюзі з'явиться ЕРС E_2' , наведена за законом електромагнітної індукції й рівна

$$E_2' = E_1(s); \quad (4.6)$$

штрихом тут і далі відзначені наведені величини, що враховують неоднаковість обмоток статора й ротора. Частота наведеної ЕРС становить

$$f_2 = f_1 s \quad (4.7)$$

Струм I_2' у роторному ланцюзі, що володіє опором R_2' і індуктивністю L_2' , визначиться як

$$I_2' = \frac{E_2'}{\sqrt{(R_2')^2 + (2\pi f_2 L_2')^2}}$$

або після простих перетворень

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + (X_2')^2}}, \quad (4.8)$$

де X_2' - індуктивний опір розсіювання вторинного ланцюга при частоті f_1 .

Ми одержали рівняння, що відповідає традиційній схемі заміщення фази асинхронного двигуна - мал. 4.3, у якій враховані й параметри статора R_1 і X_1 . Ця проста модель придатна для аналізу сталих режимів при симетричному двигуні із симетричним живленням.

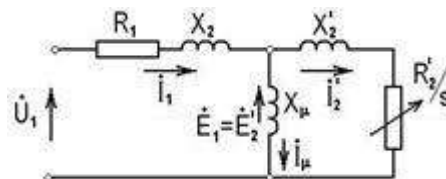


Рис. 4.3. Схема заміщення фази асинхронного двигуна

15.2. Механічні характеристики. Енергетичні режими

Для одержання механічної характеристики ще більше спростимо модель - винесемо контур намагнічування на затискачі - рис. 4.4,а, як це часто робиться в курсі електричних машин.

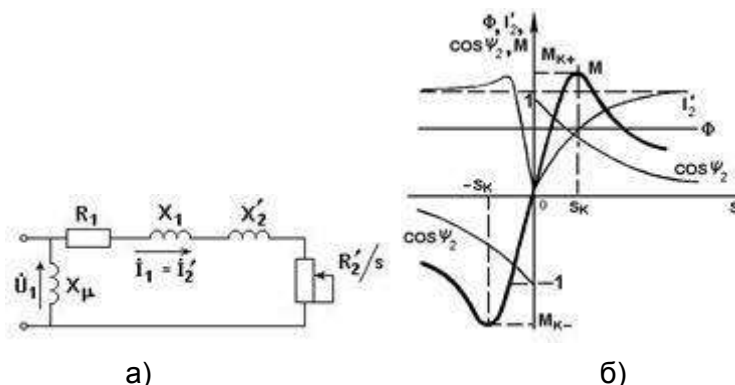


Рис. 4.4. Спрощена схема заміщення (а) і характеристики асинхронної машини (б)

Оскільки

$$M = k\Phi I_{2a} = k\Phi I_2 \cos \psi_2,$$

де I_{2a} - активна складова струму ротора,

ψ_2 - кут між $\vec{E}_2$ і $\vec{I}_2$,

якісне подання про механічну характеристику $M(s)$ можна одержати, простеживши залежність кожного із трьох співмножників від s .

Магнітний потік Φ у першому наближенні відповідно до (4.4) не залежить від s - рис.

4.4,б. Струм ротора (4.8) дорівнює нулю при $s = 0$ і асимптотично прагне до $\frac{U_1}{X_2'}$ при $s \rightarrow \pm\infty$ - рис. 4.4,б. Останній співмножник легко визначити за схемою заміщення:

$$\cos\psi_2 = \frac{R_2'/s}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + (X_2')^2}};$$

$\cos\psi_2$ близький до ± 1 при малих s і асимптотично прагне до нуля при $s \rightarrow \pm\infty$. Момент, як добуток трьох співмножників, дорівнює нулю при $s = 0$ ($\omega = \omega_0$ - ідеальний холостий хід), досягає позитивного M_{k+} і негативного M_{k-} максимумів - критичних значень при деяких критичних значеннях ковзання $\pm s_k$, а потім при $s \rightarrow \pm\infty$ прагне до нуля за рахунок третього співмножника.

Рівняння механічної характеристики одержимо, дорівнявши втрати в роторному ланцюзі, виражені через механічні й через електричні величини. Потужність, споживана з мережі, якщо зневажити втрати в R_1 , приблизно дорівнює електромагнітної потужності:

$$P_1 \approx P_{em} = M\omega_0,$$

а потужність на валу визначається як

$$P_2 = M\omega$$

Втрати в роторному ланцюзі складуть

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 \approx M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s = P_1 s \quad (4.9)$$

або при вираженні їх через електричні величини

$$\Delta P_2 = 3(I_2')^2 R_2',$$

звідки

$$M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 s}.$$

Підставивши в останнє вираження I_2' з (4.8) і знайшовши екстремум функції $M=f(s)$ і відповідні йому M_k і s_k , будемо мати:

$$M_{em} = \frac{2M_k(1+as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k} \quad (4.10)$$

де $a=R_1/R_2$:

$$M_k = \frac{3U^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}; \quad (4.11)$$

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (4.12)$$

На практиці іноді думають, що $a = 0$, тобто зневажають активним опором обмоток статора. Це звичайно не приводить до істотних погрешностей при $P_n > 5$ квт, однак може

невиправдано погіршити модель при малих потужностях. При $a = 0$ вираження (4.10) - (4.12) мають вигляд:

$$M = \frac{2M_x}{\frac{s}{s_x} + \frac{s_x}{s}}; \quad (4.10,a)$$

$$M_x = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_x}; \quad (4.11,a)$$

$$s_x = \frac{R'_2}{X_x}, \quad (4.12,a)$$

де $X_k = X_1 + X'_2$ - індуктивний опір розсіювання машини.

У рівнянні (4.10,a) при $s \ll s_k$ можна зневажити першим членом у знаменнику й одержати механічну характеристику на робочій ділянці у вигляді

$$M \approx \frac{2M_x s}{s_x}. \quad (4.13)$$

Як свідчить з мал. 4.4,б і виразів (4.10) і (4.10,a), жорсткість механічної характеристики асинхронних двигунів перемінна, на робочій ділянці $\beta < 0$, а при $s(>)s_{кр}$ - позитивна.

Асинхронний електропривод як і електропривод постійного струму, може працювати в руховому й трьох гальмових режимах з таким же, як в електроприводі постійного струму розподілом потоків енергії - рис. 4.5.

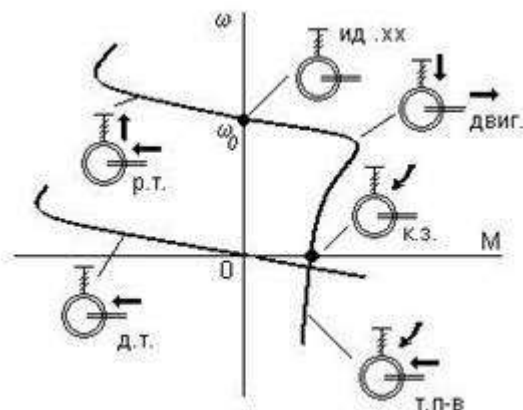


Рис. 4.5. Енергетичні режими асинхронного електропривода

Рекуперативне гальмування (р.г.) здійснюється при обертанні двигуна активним моментом зі швидкістю $\omega > \omega_0$. Цей же режим буде мати місце, якщо при обертанні ротора зі швидкістю ω зменшити швидкість обертання поля ω_0 . Роль активного моменту тут буде виконувати момент інерційних мас обертowego ротора.

Для здійснення гальмування противмикання (г.п-в) необхідно поміняти місцями дві будь-які фази статора - рис. 4.6. При цьому міняється напрямок обертання поля, машина гальмується в режимі противовмикання, а потім реверсується.

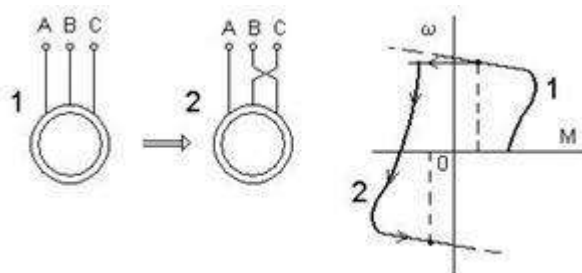


Рис. 4.6. Реверс асинхронного двигуна

Специфічним є режим динамічного гальмування, що представляє собою генераторний режим відключеного від мережі змінного струму асинхронного двигуна, до статора якого підведений постійний струм I_n . Цей режим застосовується в ряді випадків, коли після відключення двигуна від мережі потрібно його швидко зупинити без реверса.

Постійний струм, що підводиться до обмотки статора, утворює нерухоме в просторі поле. При обертанні ротора в його обмотці наводиться змінна ЕРС, під дією якої протікає змінний струм. Цей струм створює також нерухоме поле.

Складаючись, полюси статора й ротора утворюють результуюче поле, у результаті взаємодії з яким струму ротора виникає гальмовий момент. Енергія, що надходить із вала двигуна, розсіюється при цьому в опорах роторного ланцюга.

У режимі динамічного гальмування поле статора нерухоме ковзання записується як

$$s = \frac{\omega}{\omega_0}$$

і справедливі співвідношення для механічної характеристики аналогічні (4.10,а) - (4.12,а):

$$M = \frac{2M_{x,r}}{\frac{s}{s_{x,r}} + \frac{s_{x,r}}{s}}, \quad (4.14)$$

$$M_{x,r} = \frac{3I_{\text{вх}}^2 X_{\mu}^2}{2\omega_0(X_{\mu} + X_2')}, \quad (4.15)$$

де $I_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_n$ при з'єднанні обмоток статора в зірку

і $I_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_n$ при з'єднанні обмоток статора в трикутник;

$$s_{x,r} = \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'} \quad (4.16)$$

Тому що при ненасиченій машині $X_{\mu} \gg X_2'$, критичне ковзання в режимі динамічного гальмування $s_{к,г}$ істотно менше $s_{к,г}$.

15.3. Номінальні дані

В паспорті асинхронного двигуна звичайно зазначені номінальні лінійні напруги при з'єднанні обмоток у зірку й трикутник $U_{1\Delta}/U_{1\text{з}}$, струми $I_{1\Delta}/I_{1\text{з}}$, частота $f_{1\text{н}}$, потужність на валу P_n , частота обертання n_n , ККД, частота $f_{1\text{н}}$, потужність на валу P_n , частота обертання n_n , ККД η_n , $\cos \varphi_n$.

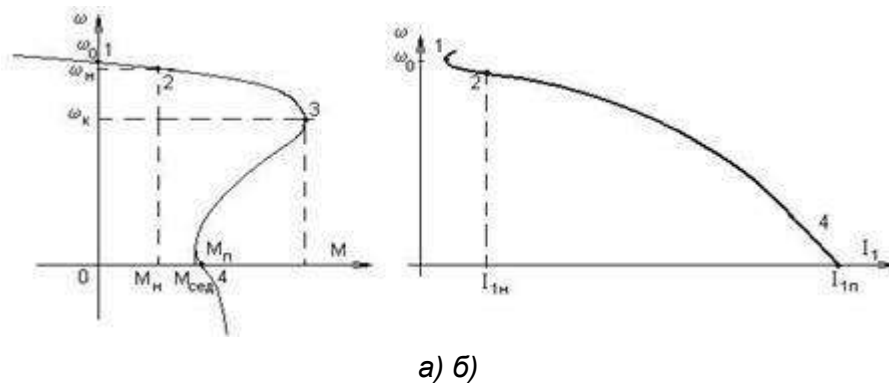
Для двигунів з короткозамкненим ротором у каталозі приводяться кратності

пускового струму $k_I = \frac{I_{1\text{п}}}{I_{1\text{н}}}$, пускового моменту $k_M = \frac{M_{\text{п}}}{M_n}$, критичного

моменту $\lambda = \frac{M_x}{M_n}$, іноді - типові природні характеристики.

Для двигунів з фазним ротором указується ЕРС на розімкнутих кільцях загальмованого ротора $E_{2\text{н}}$ при $U_{1\text{н}}$ і номінальний струм ротора $I_{2\text{н}}$.

Приводять у каталозі даних недостатньо, щоб визначити по них параметри схеми заміщення й користуватися їй при всіх розрахунках, однак за каталожними даними можна побудувати природну електромеханічну й механічну характеристики, скориставшись декількома опорними точками - рис. 4.7.



а) б)
Рис. 4.7. До побудови природних характеристик асинхронного двигуна з к.з. ротором

Точка 1 ($\omega = \omega_0, M = 0, I_1 = I_{1к} \approx 0,35 I_{1н}$) вийде з ряду $n_0 = 3000, 1500, 1000, 750, 600$ про/хв як найближча більшу до n_n ; вийде з ряду $n_0 = 3000, 1500, 1000, 750, 600$ про/хв як найближча

більшу до n_n ;
 $\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}$.

Точка 2 - номінальна.

Для визначення точки 3 ($\omega = \omega_k, M = M_k$) потрібно розрахувати) потрібно

розрахувати $M_k = \frac{P_k}{\omega_k}$, визначити $M_k = \lambda M_n$ й обчислити s_k по (4.10) або (4.10,а), підставивши в ці рівняння M_n і й обчислити s_k по (4.10) або (4.10,а), підставивши в ці рівняння

$$M_n \text{ і } s_k = \frac{\omega_0 - \omega_k}{\omega_0}.$$

Точка 4 ($\omega = 0, M = M_n, I_1 = I_{1н}$) розраховується безпосередньо за каталожним даними.

Сучасні двигуни з короткозамкненим ротором проектують так, щоб мати підвищений пусковий момент M_n , і в деяких каталогах указують так званий "сідловий" момент $M_{сід}$ - рис. 4.7,а.

Деяке подання про характеристики сучасних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором можна одержати з наступних даних:

$s_n = 0,01-0,05$ (менші значення у двигунів більшої потужності - сотні квт);

$k = 5-7$;

$k_M = 1,3-1,6$;

$\lambda = 1,8-3,0$.

Як виходить із цих даних, природні властивості асинхронних двигунів досить несприятливі: малий пусковий момент, великий пусковий струм і саме головне - обмежена можливості керування координатами.

16. ПРОМІЖНИЙ КОНТРОЛЬ ЗНАНЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТОМ РОБОТИ ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОГО ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

Контрольні заходи включають поточний контроль знань здобувачів. Поточний контроль є органічною частиною навчального процесу і проводиться під час практичних занять.

Форми поточного контролю має вид: на початку практичного заняття (за варіантом списку академічної групи електронного журналу). проводиться демонстрація презентації та доповіді за підсумками самостійного аналізу та дослідження представленої теми індивідуального завдання. Після чого, усна співбесіда за матеріалами розглянутої теми з оцінкою відповідей студентів (5-10 хв.).

При кредитно-модульній системі доповідь та вивчення теми самостійної роботи входять у модуль, який контролюється після закінчення логічно завершеної частини лекцій та інших видів занять з дисципліни та їх результати враховуються при виставленні підсумкової оцінки.

17. ПЕРЕЛІК ТЕМ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

- 1 Яке призначення електричних машин і трансформаторів?
- 2 Опишіть які фізичні явища відбуваються при роботі електричних машин, вкажіть основні формули
- 3 Класифікація електричних машин
- 4 Область застосування та принцип дії трансформаторів
- 5 Опишіть призначення трансформаторів
- 6 Рівняння напруг для первинного кола трансформатора
- 7 Рівняння напруг для вторинного кола трансформатора
- 8 Рівняння МРС та струмів трансформатора
- 9 Схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів
- 10 Умовні позначення виводів обмоток трифазних трансформаторів
- 11 Види втрат енергії в трансформаторі
- 12 Коефіцієнт корисної дії трансформатора
- 13 Як здійснюється регулювання напруги трансформаторів
- 14 Напишіть основні рівняння, особливості роботи та область застосування Триобмоткових трансформаторів
- 15 Принцип роботи понижуючого автотрансформатора
- 16 Опишіть основні переваги автотрансформаторів у порівнянні з трансформатором
- 17 Трансформатор з рухомою вторинною обмоткою та однофазний трансформатор з підмагнічуючим шунтом
- 18 Трансформатор з рухомим сердечником
- 19 Принцип дії синхронного генератора та синхронного двигуна
- 20 Визначення ЕРС обмотки статора синхронного генератора
- 21 Загальні принципи роботи та характеристики електроприводів
- 22 Прості моделі асинхронного електропривода, які використовуються в професійній діяльності
- 23 Електропривод ДПС (призначення та класифікація, механічні властивості та режими роботи ДПС з незалежним (паралельним) та послідовним збудженням)

18. ЗАВДАННЯ (ТЕСТИ) ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

1Робота трансформатора заснована на явищі ...

- 1) магнітного поля, що обертається;
- 2) взаємодії струмів в обмотках;
- 3) взаємодії струмів в обмотках;
- 4) виникнення вихрових струмів.

2Обмотка трансформатора, яку підключають до джерела змінної напруги, називається ...

- 1) первинною;
- 2) вторинної;
- 3) навантаженням;
- 4) споживачем.

3Обмотку нижчої напруги трансформатора роблять із ... перерізу

- 1) мідного дроту великого;
- 2) мідного дроту малого;
- 3) алюмінієвого дроту великого;
- 4) алюмінієвого дроту малого.

4Сердечник трансформатора збирають із ...

- 1) залізних стрижнів;
- 2) алюмінієвих листів;
- 3) листів електротехнічної сталі;
- 4) стрижні електротехнічної сталі.

5Трансформатор буде знижуючим, якщо ...

- 1) $U_1 > U_2$;
- 2) $E_1 = E_2$;
- 3) $U_1 < U_2$
- 4) $U_1 > E_1$

6Передавати електроенергію доцільно при напрузі ...

- 1) низький;
- 2) високому.

7Знижувальний трансформатор підвищити напругу мережі ...

- 1) може;
- 2) не може.

8Розширювач трансформатора повністю заповнити мінеральним трансформаторним маслом.

- 1) можна;
- 2) не можна.

9Трансформатори знайшли широке застосування ...

- 1) у лініях електропередачі;
- 2) у техніці зв'язку;
- 3) в автоматичній та вимірювальній техніці;
- 4) у всіх перерахованих областях.

10Діюче значення ЕРС Е первинної обмотки визначається за формулою ...

- 1) $E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m$;
- 2) $E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m$;
- 3) $E_1 = 4,44 f w_2 \Phi_m$;

11Трансформатором називається електротехнічний пристрій, що служить для перетворення ...

- 1) постійного струму однієї напруги в постійний струм іншої напруги;
- 2) змінного струму однієї напруги змінний струм іншої напруги тієї ж частоти;
- 3) постійного струму змінний струм.

12Обмотка трансформатора, яку підключають до приймача змінного струму, називається:

- 1) первинною;
- 2) вторинної;
- 3) навантаженням;
- 4) споживачем.

13Обмотку вищої напруги трансформатора роблять із ... перерізу.

- 1) мідного дроту великого;
- 2) мідного дроту малого;
- 3) алюмінієвого дроту великого;
- 4) алюмінієвого дроту малого.

14Сердечник трансформатора збирають, з листів електротехнічної сталі, ізольованих один від одного для того, щоб...

- 1) збільшити втрату електричної енергії;
- 2) зменшити втрати на вихрові струми;
- 3) підвищити втрати на вихрові струми;
- 3) зменшити електричну енергію.

15Основні частини трансформатора ...

- 1) обмотки, магнітопровід;
- 2) перетворювач напруги, обмотки;
- 3) електромагніт, котушки; розширювач;
- 4) обмотки, електроприймач.

16Споживати електроенергію доцільно при напрузі ...

- 1) високому;
- 2) низький.

17 Підвищуючий трансформатор зменшить напругу мережі ...

- 1) може;
- 2) не може;

18Ближче до стрижня магнітопроводу трансформатора розташовується обмотка ... напруги

- 1) вищої;
- 2) нижчого.

19Магнітопровід трифазного трансформатора має стрижнів.

- 1) один;
- 2) два;
- 3) три;
- 4) чотири.

20Трансформатор буде підвищуючим, якщо...

- 1) $U_1 > U_2$;
- 2) $E_1 = E_2$;
- 3) $U_1 < U_2$
- 4) $U_1 > E_1$

№21: В режимі генератора машина постійного струму перетворює

- 1) механічну енергію в електричну
- 2) електричну енергію в механічну
- 3) світлову в електричну
- 4) хімічну в електричну

№22: В режимі двигуна машина постійного струму перетворює

- 1) механічну енергію в електричну
- 2) електричну енергію в механічну

№23 Коефіцієнт корисної дії машини постійного струму визначається

- 1) добутком корисної потужності до затраченої
- 2) відношенням затраченої потужності до корисної
- 3) відношенням корисної потужності до затраченої

№24: Перемикання щітками пластин колектора, що зумовлює зміну напрямку струму в провідниках якоря, називають

- 1) реакцією якоря
- 2) комутацією
- 3) незалежним збудженням

№25: Електромагнітний момент машини постійного струму визначається двома величинами:

- 1) магнітним потоком і напругою якоря
- 2) магнітним потоком і опором якоря
- 3) магнітним потоком і струмом якоря

№26: Реверс – це

- 1) зміна напрямку обертання якоря
- 2) зміна напрямку обертання ротора

№27: Особливості універсальних колекторних двигунів:

- 1) можуть працювати як від мережі постійного струму, так і від мережі однофазного змінного струму
- 2) можуть працювати тільки від мережі змінного струму

№28: Рівняння генератора:

- 1) $U = E + R_{\text{я}} I$
- 2) $U = E - R_{\text{я}} I$
- 3) $E = U + R_{\text{я}} I$
- 4) $E = U - R_{\text{я}} I$

№29: Рівняння двигуна:

- 1) $U = E + R_{\text{я}} I$
- 2) $U = E - R_{\text{я}} I$
- 3) $E = U - R_{\text{я}} I$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яцун М.А. Електричні машини: підручник. Львів, 2011. - 464 с.
2. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник/М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
3. Белікова Л.Я., Шевченко В.П. Електричні машини: Навчальний посібник. – Одеса: Наука і техніка, 2012. – 480 с.
4. Яцун Я.А. Електричні машини: Підручник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 464 с.
5. Проектування електричних машин: Навч. посібник/ Д.В. Ципленков, Ю.В. Куваєв, О.Б. Іванов, І.А. Кириллов. За ред. Ф.П. Шкрабця. – Д: Національний гірничий університет, 2008. – 325 с.
6. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навч. посіб. / за ред. В. І. Мілих. Київ: Каравела, 2018. - 452 с.
7. Електричні машини /Конспект лекцій (частина 1) для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання, напрям підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» /Суми, 2021. - 121 с.
8. Методичні вказівки до виконання практичних занять з дисципліни "Електричні машини" для студентів 3 курсу бакалавр, спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», денна та заочна ФН / Суми, 2023. - 43 с.
9. Електричні машини / Методичні вказівки щодо виконання лабораторно-практичних робіт (частина 1) для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання, напрям підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» /Суми, 2019. - 98 с.
10. Електричні машини / Методичні вказівки щодо виконання самостійної роботи (частина 1) для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання, напрям підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» /Суми, 2018. - 121 с.
11. Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 327 с.
12. Ivanov, O.B., Shkrabets, F.P., Zawilak, Jan. (2011)."Electrical generators driven by renewable energy systems", Wroclaw University of Technology, Wroclaw – 169 p.
13. Проектування електричних машин: навч. посіб. / Д. В. Ципленков, О. Б. Іванов, О. В. Бобров, В. В. Кузнецов, В. В. Артемчук, М. О. Баб'як; нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2020. - 408 с. Калиниченко С.П., Карпенко Н.П. Машини постійного струму: Конспект лекцій. – Х.: УкрДАЗТ, 2012. – Ч.1. – 69 с.
14. Карпенко Н.П., Нерубацький В.П. Методичні вказівки «Розрахунок трифазного силового масляного трансформатора» до виконання курсової роботи з дисципліни «Електричні машини». – Х.: УкрДУЗТ, 2014. – 50 с.
15. Карпенко Н.П., Нерубацький В.П. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з дисципліни «Електричні машини». – Х.: УкрДУЗТ, 2015. – 16 с.
16. Електронний репозитарій СНАУ– Режим доступу: <https://repo.snau.edu.ua/>.
17. Бібліотека ДНУЗТ та її репозитарій. – Режим доступу: <https://library.diit.edu.ua/uk/catalog>, <https://library.diit.edu.ua/uk/catalog?category=books-and-other>.
18. <http://elibrary.nubip.edu.ua> - електронна наукова бібліотека НУБіП України.
19. <http://energ.nauu.kiev.ua/> - навчально-інформаційний портал ННІ енергетики і автоматики
20. <http://www.nbuv.gov.ua/> - національна бібліотека України імені В.І. Вернадського, Київ.

Чепіжний Андрій Володимирович

Юрченко Олександр Юрійович

Рясна Ольга Василівна

Тесленко Олена Володимирівна

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

**Частина 1 – Трансформатори. Машини постійного струму.
Основи електроприводу.**

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет, вул.Г.Кондратьєва,160

Підписано до друку: січень, 2025 р. Формат А5: ГарнітураTimesNewRoman

Тираж: 100примірників Замовлення_____ Ум. друк. арк. 3.8
