

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Гончаренко Ю.П.
Ярош Я.Д.
Денисюк А.Ю.
Полещук І.І.
Паламарчук А.С.
Федяєв О.Л.

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Житомир

2024

Затверджено Вченою радою Поліського національного університету як навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 «Електрична інженерія»

Гриф надано Вченою Радою Поліського національного університету(протокол №10 від 29.05.2024)

УДК 621.317.08

0-75

Рецензенти: Пількевич Ігор Анатолійович, д-р. техн. наук, професор,
Житомирський військовий інститут
Дубина Олександр Федорович, канд. техн. наук, доцент, Державний
університет “Житомирська політехніка”
Журавльов Валерій Пилипович, д-р фіз.- мат. наук, професор,
Поліський національний університет

Автори: Гончаренко Юрій Павлович, канд. техн. наук, доц.
Ярош Ярослав Дмитрович, д-р. техн. наук, проф.
Денисюк Анатолій Юрійович, канд. техн. наук, доц.
та інші

0-75

Основи електротехніки.: навч. посібник для студентів, галузі знань 14 «Електрична інженерія», всіх форм навчання / Ю. П. Гончаренко, Я. Д. Ярош, А. Ю. Денисюк та інші. Житомир : Поліський нац. університет, 2024. 265 с.

Навчальний посібник підготовлено відповідно до освітніх навчальних програм бакалаврів галузей знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», а також навчального курсу «Теоретичні основи електротехніки». В посібнику розглянуто основи теорії електричних і магнітних кіл. Описано будову та роботу електричних машин і трансформаторів, наведено основні поняття щодо електроприводу, електропостачання та електробезпеки.

Для студентів, бакалаврів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», фахівців даної галузі.

© Ю. П. Гончаренко,

© Я.Д. Ярош,

© А.Ю. Денисюк

© І.І. Полещук,

© А.С. Паламарчук,

© О.Л. Федяєв.

© Поліський національний університет, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
Розділ 1 ОСНОВИ ТЕОРІЇ КІЛ.....	9
1.1 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	9
1.1.1 Елементи електричного кола.....	9
1.1.2 Закони проходження електричного струму.....	13
1.1.3 Властивості з'єднань елементів електричних кіл.....	15
1.2 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ГАРМОНІЙНОГО СТРУМУ.....	17
1.2.1 Параметри гармонійного коливання.....	17
1.2.2 Комплексне відображення гармонійних коливань та їх векторна діаграма.....	19
1.2.3 Комплексний опір та закони проходження струму у комплексній формі.....	21
1.2.4 Властивості елементів у колі гармонійного струму.....	23
1.2.5 Трифазні електричні кола.....	31
1.3 МАГНІТНІ КОЛА.....	38
1.3.1 Параметри та характеристики магнітних кіл.....	38
1.3.2 Основні закони магнітних кіл.....	41
Розділ 2 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	51
2.1 ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	51
2.1.1 Принцип дії машини постійного струму.....	51
2.1.2 Будова електричних машин постійного струму.....	53
2.1.3 Обмотки якорів машин постійного струму.....	58
2.1.4 Електрорушійна сила обмотки якоря.....	60
2.1.5 Магнітна система машин постійного струму.....	61
2.1.6 Реакція якоря.....	65
2.2 ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	69
2.3 ЕЛЕКТРИЧНІ ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	72
Розділ 3 ТРАНСФОРМАТОРИ.....	82
3.1 ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	82
3.1.1 Призначення та класифікація трансформаторів.....	82
3.1.2 Принцип дії трансформаторів.....	83
3.1.3 Будова трансформаторів.....	85
3.2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСФОРМАТОРІВ...	88
3.2.1 Рівняння електрорушійних сил.....	88
3.2.2 Рівняння намагнічувальних сил.....	90
3.2.3 Трифазний трансформатор.....	93
3.3 РОБОЧІ ВЛАСТИВОСТІ ТРАНСФОРМАТОРА.....	94
3.3.1 Режим холостого ходу.....	94
3.3.2 Дослід короткого замикання.....	97
3.3.3. Втрати та коефіцієнт корисної дії трансформатора.....	99
3.4 СПЕЦІАЛЬНІ ТИПИ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	101
3.4.1 Трьохобмотковий трансформатор.....	101

3.4.2 Автотрансформатор.....	102
3.4.3 Трансформатор для електродугового зварювання.....	104
3.4.4 Вимірювальні трансформатори напруги і струму.....	105
Розділ 4 СИНХРОННІ МАШИНИ.....	110
4.1 ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА СИНХРОННИХ МАШИН.....	110
4.1.1 Принцип дії синхронних машин.....	110
4.1.2. Збудження синхронних машин.....	112
4.1.3 Типи синхронних машин та їх будова.....	113
4.2 ОБМОТКИ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ.....	115
4.2.1 Виконання обмоток статора.....	115
4.2.2. Електрорушійна сила фазної обмотки статора.....	117
4.2.3 Реакція якоря синхронного генератора.....	120
4.2.4 Характеристики синхронного генератора.....	127
4.3 СИНХРОННІ ДВИГУНИ.....	135
4.3.1 Принцип дії синхронного двигуна.....	135
4.3.2 Робочі характеристики синхронного двигуна.....	138
4.3.3 Пуск у хід синхронних двигунів.....	139
Розділ 5 АСИНХРОННІ МАШИНИ.....	142
5.1 ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА АСИНХРОННИХ МАШИН.....	142
5.1.1 Принцип дії трифазного асинхронного двигуна.....	142
5.1.2 Будова асинхронних двигунів.....	143
5.2 РОБОЧИЙ ПРОЦЕС АСИНХРОННОЇ МАШИНИ.....	145
5.2.1 Електрорушійні сили в обмотках асинхронного двигуна.....	145
5.2.2 Рівняння намагнічувальних сил і струмів асинхронного двигуна.....	147
5.2.3 Приведення параметрів обмотки ротора до обмотки статора.....	149
5.2.4 Векторна діаграма асинхронного двигуна.....	150
5.2.5 Схема заміщення асинхронного двигуна.....	151
5.3 РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	153
5.3.1 Втрати і коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна.....	153
5.3.2 Електромагнітний момент асинхронного двигуна.....	154
5.3.3 Робочі характеристики асинхронного двигуна.....	157
5.3.4 Режими роботи асинхронних машин.....	159
5.4 ПУСК У ХІД ТА РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.....	162
5.4.1 Пуск у хід асинхронного двигуна.....	162
5.4.2 Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна.....	167
5.5 ОДНОФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ.....	171
5.5.1 Принцип дії однофазного асинхронного двигуна.....	171
5.5.2 Пуск у хід однофазного асинхронного двигуна.....	172
5.5.3 Асинхронні конденсаторні двигуни.....	174
5.5.4 Універсальні асинхронні двигуни.....	176
5.5.5 Асинхронний виконавчий двигун.....	177
Розділ 6 ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ.....	183
6.1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	183
6.1.1 Структура електричних мереж.....	183
6.1.2 Призначення електричних мереж.....	184

6.1.3 Класифікація електричних мереж.....	184
6.1.4 Напруги електричних мереж.....	188
6.1.5 Режими нейтралі мереж різних напруг.....	190
6.2 КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ПОВІТРЯНИХ І КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ.....	196
6.2.1 Виконання повітряних ліній.....	196
6.2.2 Кабельні лінії.....	204
6.2.3 Внутрішні мережі.....	209
6.2.4 Нові конструкції проводів та кабелів.....	211
6.3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ..	214
6.3.1 Вимоги до електричних мереж і загальні знання про їх розрахунок..	214
6.3.2 Вибір проводів і кабелів за нагрівом.....	215
6.3.3 Вибір перерізів проводів і параметрів захисних пристроїв у мережах напругою до 1000 В.....	217
6.4 ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	220
6.4.1 Класифікація електричних апаратів.....	220
6.4.2 Рубильники.....	221
6.4.3 Кнопки керування.....	222
6.4.4 Універсальні перемикачі.....	222
6.4.5 Реле.....	223
6.4.6 Магнітні пускачі.....	223
6.4.7 Автоматичні вимикачі.....	225
Розділ 7 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ.....	232
7.1 ЗАСОБИ І ЗАХОДИ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ В НОРМАЛЬНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК.....	232
7.1.1 Електрозахисні заходи.....	232
7.1.2 Електрозахисні засоби.....	233
7.2 ЗАХИСНЕ ЗАЗЕМЛЕННЯ.....	242
7.2.1 Призначення та принцип дії захисного заземлення.....	242
7.2.2 Основні типи заземлюючих пристроїв.....	243
7.3 ЗАХИСНЕ ЗАНУЛЕННЯ.....	247
7.3.1 Призначення, принцип дії та принципова схема занулення.....	247
7.3.2 Системи заземлення трифазних електричних мереж змінного струму напругою до 1000 В у відповідності до вимог МЕК.....	249
7.4 ЗАХИСНЕ ВІДКЛЮЧЕННЯ.....	252
7.4.1 Класифікація ПЗВ.....	253
7.4.2 Принцип дії ПЗВ.....	255
7.4.3 Технічні параметри ПЗВ.....	256
7.4.4 Встановлення ПЗВ.....	257
7.4.5 Вибір ПЗВ.....	260
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	264
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЗЧИК.....	265

ВСТУП

Навчальний посібник призначений для надання допомоги здобувачам вищої освіти щодо успішного оволодіння теоретичним і практичним матеріалом навчальної дисципліни “Теоретичні основи електротехніки”. Розглянуто основи теорії електричних і магнітних кіл. Описано будову та роботу електричних машин та трансформаторів, наведено поняття електроприводу, електропостачання та електробезпеки.

Основними завданнями курсу є ознайомлення студентів із конструктивним виконанням електричних машин і трансформаторів, електричних мереж та апаратів, методами розрахунку й аналізу усталених режимів, основами проектування, а також способами регулювання режимів і підвищення економічності їх роботи. Метою вивчення дисципліни є надання необхідних знань майбутнім фахівцям для забезпечення безпеки при обслуговуванні та експлуатації електротехнічних установок, машин та пристроїв загального призначення.

Структура та зміст посібника відповідають робочій навчальній програмі дисципліни “Теоретичні основи електротехніки” для студентів за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. Крім того, навчальний посібник може бути використаний студентами при підготовці кваліфікаційних робіт з даної спеціальності.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АВ	–	автоматичний вимикач
АВР	–	автоматичне включення резерву
АГ	–	асинхронний генератор
АПВ	–	автоматичне повторне включення
АСД	–	асинхронний двигун
ВН	–	висока напруга
ВТС	–	вимірювальний трансформатор струму
ВТН	–	вимірювальний трансформатор напруги
ВКЗ	–	відношення короткого замикання
ГПС	–	генератор постійного струму
ДПС	–	двигун постійного струму
ДЖ	–	джерело живлення
ЄЕ	–	ємнісний елемент
ЕК	–	електричне коло
ЕРС	–	електрорушійна сила
ЕП	–	електроприймач
ЕУ	–	електроустановка
ЗЗ	–	захисні засоби
ІДН	–	ідеальне джерело напруги
ІДС	–	ідеальне джерело струму
ІЕ	–	індуктивний елемент
КЛ	–	кабельна лінія електропередачі
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
КТП	–	комплектна трансформаторна підстанція
КЗ	–	коротке замикання
ЛЕП	–	лінія електропередачі
МП	–	магнітний пускач
МПС	–	машина постійного струму
НН	–	низька напруга
НС	–	намагнічувальна сила
ПБЗ	–	переключення без збудження
ПЗВ	–	пристрій захисного відключення
ПР	–	пусковий реостат
ПТБ	–	правила техніки безпеки
ПУЕ	–	правила устаткування електроустановок
ПТЕ	–	правила технічної експлуатації
ПЛ	–	повітряна лінія електропередачі
ПС	–	підстанція
РЕ	–	резистивний елемент
РПН	–	регулювання під навантаженням
РНО	–	регулятор напруги однофазний
РНТ	–	регулятор напруги трифазний
РП	–	розподільний пункт

РУ	–	розподільна установка
СГ	–	синхронний генератор
СД	–	синхронний двигун
СП	–	самоутримні ізольовані проводи
СЕС	–	система електропостачання
СК	–	синхронний компенсатор
СН	–	середня напруга
ТП	–	трансформаторна підстанція
ХХ	–	холостий хід

Розділ 1

ОСНОВИ ТЕОРІЇ КІЛ

1.1 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1.1 Елементи електричного кола

Радіоелектронні пристрої складаються з різноманітних приладів та радіокомпонентів, які з'єднуються між собою для утворення певних кіл протікання електричного струму. Приймання, обробка та передавання інформації в таких пристроях відбуваються фактично за рахунок певного впливу відповідних електричних кіл на зміну параметрів струму, що протікає через них.

Електричним колом (ЕК) називається реальний фізичний об'єкт, що складається з сукупності з'єднаних між собою джерел, споживачів та перетворювачів електричної енергії.

Стан ЕК, а також процеси, що в ньому відбуваються, характеризуються значеннями певних електричних величин, основними з яких є електричний струм, напруга, електричний потенціал, миттєва потужність та енергія. Загалом значення цих величин можуть змінюватися як у часі, так і в просторі.

Електричним струмом називається спрямоване переміщення зарядів у газах, рідинах, твердих тілах, вакуумі тощо.

Сила струму як швидкість зміни заряду в часі характеризується значенням та напрямком та може бути як постійною I , так і змінною $i(t)$. Її значення вимірюється в амперах та кратних одиницях: міліамперах, мікроамперах (А, мА, мкА), а напрямок визначається знаком. Знак визначається напрямом руху зарядів одного знаку. В реальних колах за позитивний напрям струму беруть напрям переміщення позитивних зарядів.

Електрична напруга, яка є різницею потенціалів між певними точками електричного кола, визначається кількістю електричної енергії, що витрачається на переміщення одиниці позитивного заряду з однієї точки в іншу не залежно від конфігурації шляху. Напруга може бути як постійною U , так і змінною $u(t)$. Вона вимірюється у вольтах та кратних одиницях: кіловольтах, мілівольтах, мікрвольтах (В, кВ, мВ, мкВ).

Потенціал ϕ певної точки електричного кола – це величина, яку визначають відношенням потенціальної енергії W до заряду Q , зосередженого в певній точці: $\phi = W/Q$.

Точка з нульовим потенціалом характеризується нульовим значенням потенціальної енергії і для реального ЕК називається заземленням. У таку точку стікаються всі заряди.

Будь-яке електричне коло складається із певним чином взаємозв'язаних елементів, а отже, характеризується їх набором та способом з'єднання.

Елемент – це неподільна складова кола, яка має певне самостійне функціональне призначення та графічне зображення.

Відповідно до цього визначення елемент не може бути поділений на складові, кожна з яких виконувала б окрему функцію. В ЕК інформаційних та радіотехнічних систем такими елементами є, наприклад, резистори, конденсатори, котушки індуктивності, дроселі, транзистори, діоди та інші.

Однак незважаючи на те, що радіоелектронні пристрої складаються з багатьох видів елементів (радіокомпонентів), у теорії замість них розглядається невелика кількість ідеалізованих, через які можна подати всі існуючі реальні елементи. Взагалі всі елементи мають властивості накопичувати, розсіювати та генерувати електричну енергію, але залежно від того яка з властивостей є домінуючою, вони поділяються на дві великі групи: джерела та приймачі електричної енергії або активні та пасивні елементи.

Пасивні елементи – це такі, що не є джерелами електричної енергії. За характером впливу на електричний струм вони поділяються на *реактивні* та *дисипативні*.

Реактивні – це такі пасивні елементи, які здатні накопичувати електричну енергію, а потім віддавати її іншим елементам ЕК. До них відносяться *ємнісний (ЄЕ)* та *індуктивний(ІЕ)* елементи.

При цьому ЄЕ, графічне зображення якого показане на рис. 1.1.1, б, здатний накопичувати енергію в електричному полі у вигляді заряду Q і потім її віддавати. Ця здатність до накопичення енергії характеризується ємністю C , що пов'язує накопичений заряд Q з напругою на елементі U_C :

$$U_C = Q / C, \quad U_C = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau.$$

Найпростішим реальним елементом, який має ємність, є конденсатор.

Навпаки, ІЕ (рис. 1.1.1, в) здатний накопичувати енергію у магнітному полі і віддавати її іншим елементам у вигляді ЕРС самоіндукції. Ця здатність характеризується його індуктивністю L , яка пов'язує потокозчеплення ψ зі струмом, який протікає через ІЕ, або напругу на ньому – зі швидкістю зміни струму через нього:

$$\psi = LI, \quad U_L = L \cdot di(t) / dt.$$

Найпростішим реальним елементом, що має індуктивність, є котушка.

Дисипативні елементи – це такі елементи, що тільки розсіюють енергію відповідно до струму, який через них протікає. Ця здатність до розсіювання енергії характеризується опором R . Зазвичай, цей опір (рис. 1.1.1, а) називають активним, на відміну від опору реактивних елементів – реактивного опору, а сам елемент – *резистивним* елементом (РЕ). Опір РЕ пов'язує спад напруги на ньому з величиною струму

$$U_R = I_R R.$$

Найпростішим реальним елементом, що має опір, є резистор.

Активні елементи – це такі елементи, що здатні забезпечувати електричні кола енергією. Найпростіших ідеальних активних елементів два: джерело напруги та джерело струму. Прийнято, що в ідеальних джерелах не виникає розсіювання енергії (чого немає насправді), і вони мають необмежену потужність.

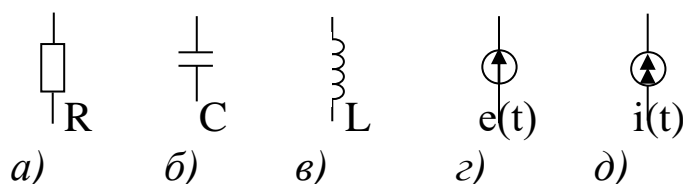


Рис. 1.1.1

Ідеальне джерело напруги (ІДН) – це такий активний елемент, напруга на якому не залежить від параметрів ЕК. Напруга ІДН – це його ЕРС, і вона може бути як постійною E , так і змінною $e(t)$. Умовне позначення ІДН наведено на рис. 1.1.1, г, де стрілкою вказується напрям зростання потенціалу або прийнятий позитивний напрям відліку змінного струму.

Ідеальне джерело струму (ІДС) – це такий активний елемент, струм якого не залежить від параметрів ЕК, в яке він увімкнений. Його струм може бути, відповідно, постійним – I чи змінним – $i(t)$ (рис. 1.1.1, д). Позитивний напрям струму вказується подвійною стрілкою у напрямку більшого потенціалу. ІДС можна уявити як послідовне з'єднання джерела дуже значної напруги та відповідного опору.

Ідеальні джерела напруги та струму використовуються для опису реальних джерел сигналів або напруги живлення.

Електричні кола (ЕК) прийнято зображати електричними схемами. Однак у ході аналізу звертають увагу на певні геометричні властивості схем – топологічні елементи ЕК, до яких належать:

- гілка – ділянка кола, через всі елементи якої протікає один і той же струм і яка з'єднується з іншими його частинами за допомогою двох полюсів (виводів);
- вузол – місце з'єднання виводів трьох і більше гілок або елементів;
- контур – замкнений шлях, що починається та закінчується в одній точці і вздовж якого кожен вузол зустрічається не більше, ніж один раз.

Якщо всередині контуру немає гілок, з'єднаних із ним, то він називається простим (осередком).

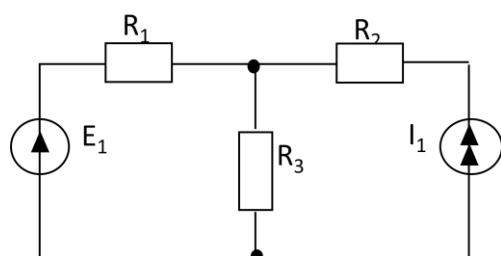


Рис. 1.1.2

На схемах ЕК вузли зображуються точками (рис. 1.1.2).

Структура будь-якого ЕК взагалі визначається кількістю елементів та способом їх з'єднання не залежно від індивідуальних властивостей елементів.

Серед численних видів з'єднань найпростішими є послідовне, паралельне та змішане.

Послідовним називають з'єднання двополюсних елементів та гілок, за якого струм на всіх компонентах з'єднання є однаковим або змінюється за одним і тим самим законом, а загальна напруга на його зовнішніх виводах у будь-який момент часу дорівнює алгебричній сумі напруг його компонентів.

Паралельним називають з'єднання, за якого гілки та двополюсники (або тільки гілки чи двополюсники) з'єднані з однією і тією ж парою виводів, при цьому напруга на всіх компонентах з'єднання є однаковою або змінюється за одним і тим же законом, а алгебрична сума струмів, що протікають через гілки (компоненти), дорівнює значенню струму, що є загальним для всього з'єднання.

Змішане – це таке з'єднання гілок (компонентів), за якого одне ЕК містить і послідовне, і паралельне з'єднання.

Електричні кола, які містять певну кількість елементів, із відповідним способом з'єднання класифікуються на нерозгалужені кола, в яких всі елементи з'єднані послідовно, та розгалужені, в яких є частини, що з'єднані паралельно.

Серед розгалужених ЕК виділяють кола змішаного з'єднання, у яких є і послідовне, і паралельне з'єднання елементів, та ЕК складного з'єднання: зіркою, трикутником тощо.

Якщо параметри пасивних елементів ЕК сталі, то воно називається лінійним непараметричним. У разі залежності параметрів R , L , C від напруги (струму), наприклад напрямку струму, такі ЕК називаються нелінійними. У разі зміни параметрів R , L , C у часі відповідні ЕК називаються параметричними, або колами зі змінними параметрами.

За видами вхідної напруги (струмів) розрізняють ЕК постійного та змінного струму. За кількістю виводів (полюсів) – двополюсні, триполюсні, чотириполюсні та багатопольсні ЕК, про що мова буде йти пізніше.

Електричні струми і напруги, що існують у гілках ЕК, характеризуються не тільки значеннями, але і напрямками. Напрями відліку струму та напруги вибирають для однозначного тлумачення знака цих величин під час аналізу (розрахунку) ЕК. Оскільки напруга між точками (вузлами) ЕК, для прикладу між “ a ” та “ b ” (рис. 1.1.3), U_{ab} – це різниця їх потенціалів:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b,$$

то вона вважається позитивною, коли $\varphi_a > \varphi_b$. Такий напрям напруги (полярність) вказується стрілкою від точки з більшим потенціалом до точки з меншим або для постійного струму позначками “+” та “-”. Знак “+” (початок стрілки) позначає ту точку ЕК, від потенціалу якої віднімається потенціал іншої точки, позначеної знаком “-” (кінець стрілки) під час визначення напруги між цими точками. Вважають, що точка з позначкою “+” має більший потенціал, ніж точка, позначена як “-”. Тоді фактична напруга є позитивною, якщо при переході від “+” до “-” (або у напрямі

стрілки) потенціал зменшується, і негативною, якщо в тому самому напрямку потенціал збільшується. Позитивний напрям відліку струму також показують стрілкою на схемі ЕК. При цьому струм, що тече у напрямі стрілки, вважають позитивним, а в протилежному – негативним. Наприклад, напрям стрілок є позначенні ЕРС E та струму I у колі на рис. 1.1.3, а збігається, а у напруги на затискачах ІДН – протилежний.

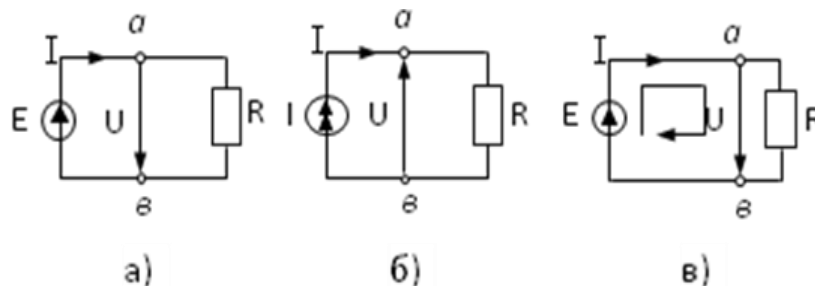


Рис. 1.1.3

Однак під час аналізу ЕК може виникати неоднозначність у визначенні знака напруги через індекси. Тому використовують інший спосіб визначення напрямку напруги: вибирають довільний напрям відліку напруг (напрямок обходу контуру), після чого позитивною вважається та напруга, напрям якої збігається з напрямком обходу (рис. 1.1.3, в). Аналогічний підхід і до визначення напрямку та знака струму в колі.

Як зазначалось вище, ЕК можуть включати до свого складу різні типи елементів. Однак якщо до складу ЕК, крім інших елементів, входять реактивні елементи, то після під'єднання до нього джерел енергії (подачі сигналів) в останньому виникає перехідний процес, пов'язаний із перерозподілом цієї енергії між реактивними елементами, після чого настає усталений режим роботи ЕК. Тому вважають, що ЕК може знаходитися в *сталому* та *перехідному* режимах.

1.1.2 Закони проходження електричного струму

Аналіз ЕК має на меті розрахунок параметрів проходження струмів та розподілу напруг на елементах цього кола. Як уже зазначалось, у більшості випадків такий розрахунок виконується по-різному для кіл постійного та змінного струмів у сталому та перехідному режимах їх роботи. Проте незалежно від цього існують певні закони проходження струму або залежності між струмом та прикладеною напругою, і саме на них ґрунтуються всі методи розрахунків ЕК.

Вперше таку залежність встановлено німецьким ученим Генріхом Омом (1787–1854) для резистивного (дисипативного, тобто розсіювального) елемента.

Закон Ома пов'язує напругу на його затискачах (виводах) U_R , опір R та струм, що протікає через цей елемент I_R : *значення струму в гілці або ділянці (I_R) кола прямо пропорційне значенню прикладеної до неї напруги U_R й обернено пропорційне опору провідника R :*

$$I_R = U_R/R = U_R G .$$

Цей закон поширюється і на замкнене нерозгалужене ЕК (контур) із довільною кількістю резистивних елементів: значення струму в замкненому нерозгалуженому ЕК прямо пропорційне алгебричній сумі всіх електрорушійних сил, що діють у колі, й обернено пропорційне сумі всіх опорів цього кола:

$$I = \sum_n E_n / \sum_j R_j .$$

Для визначення суми ЕРС беруться зі знаком "+", якщо їх напрямки збігаються з напрямком відліку струму, а якщо не збігаються, то зі знаком "-". Якщо під час розрахунку виявиться, що струм $I < 0$, то він реально протікає у зворотному напрямі відносно прийнятого для нього відліку (рис. 1.1.4).

$$I = (E_1 - E_2) / (R_1 + R_2) .$$

У випадку аналізу розгалужених ЕК або для математичного відображення структурних властивостей (конфігурації) кола не залежно від індивідуальних властивостей елементів розрахунки ведуть, опираючись на перший та другий закони Кірхгофа.

Перший закон Кірхгофа у своєму класичному формулюванні є відображенням того факту, що у вузлі заряд накопичуватися не може:

$$\sum_n I_n = 0 ,$$

алгебрична сума струмів у вузлі ЕК дорівнює нулю тобто, скільки струму втікає у вузол, стільки і витікає.

Приклад (рис. 1.1.5): $I_1 + (-I_2) + I_3 = 0$, або $I_2 = I_1 + I_3$.

Другий закон Кірхгофа встановлює зв'язок між значеннями напруг гілок та ЕРС, що діють у контурі: алгебрична сума всіх ЕРС, що діють у довільному контурі ЕК, дорівнює алгебричній сумі спадів напруг на опорах цього контуру:

$$\sum_n E_n = \sum_k U_k .$$

Приклад (рис. 1.1.5): $E_1 = U_{R1} + U_{R2}$; $E_1 - E_2 = U_{R1} + U_{R3}$.

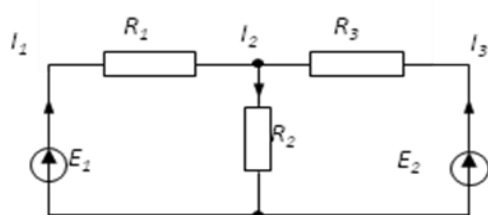


Рис. 1.1.5

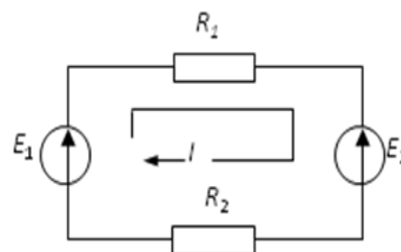


Рис. 1.1.4

Для повного розрахунку ЕК та перевірки правильності виконаних розрахунків допомагає закон балансу потужностей, який випливає із закону збереження енергії, відповідно до якого енергія нікуди не зникає, а

перетворюється з одного виду в інший. Згідно з цим законом: *алгебрична сума потужностей, які віддаються всіма джерелами енергії у ЕК, дорівнює алгебричній сумі потужностей, що витрачаються у ньому:*

$$\sum_n E_n \cdot I_n = \sum_k P_k.$$

Приклад (рис. 1.1.5):

$$E_1 I_1 - E_2 I_2 = P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} = I^2 R_1 + I^2 R_2 + I^2 R_3.$$

У разі, коли в ЕК включені джерела енергії постійного струму та в ньому закінчилися перехідні процеси, у такому колі встановлюється постійний струм, для якого ємнісний елемент є розривом відповідної гілки, а індуктивний елемент – з'єднанням гілки провідником. Тоді на струми у гілках такого ЕК впливають лише активні елементи та резистивні, що розсіюють потужність перших.

1.1.3 Властивості з'єднань елементів електричних кіл

Розглянемо можливі способи визначення струмів у гілках ЕК, якщо відомі параметри його елементів. Для цього спочатку звернемо увагу на деякі важливі властивості відповідних елементів кола за різних варіантів увімкнення.

Резистивні елементи (РЕ) в ЕК часто з'єднуються послідовно або паралельно.

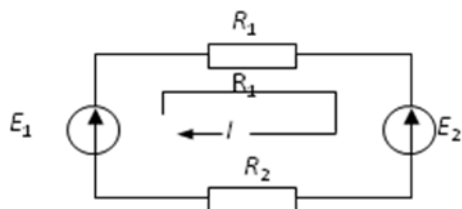


Рис. 1.1.6

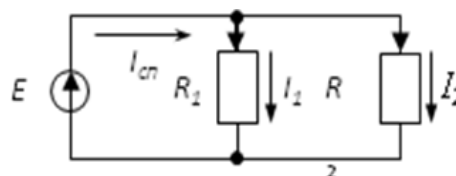


Рис. 1.1.7

За послідовного з'єднання, відповідно до закону Ома для нерозгалуженого кола, спільний опір всіх РЕ визначається сумою їх опорів:

$$R_{cn} = \sum_k R_k.$$

При цьому через всі такі РЕ протікає однаковий струм, який залежить від сумарної напруги у гілці E_{cn} :

$$I = E_{cn} / R_{cn}, \quad E_{cn} = \sum_n E_n.$$

Приклад (рис. 1.1.6): $I = (E_1 - E_2)/(R_1 + R_2)$

Однаковий струм призводить до виникнення на кожному з резистивних елементів спаду напруги, яка пропорційна величині його опору та є частиною напруги E_{cn} :

$$U_k = I R_k = E_{cn} R_k / R_{cn}$$

Тому послідовне з'єднання часто застосовується для одержання частини напруги джерела. А ЕК, створене на основі такого з'єднання, є дільником напруги.

Зауважимо, що потужність, яка розсіюється на кожному з РЕ, що з'єднані послідовно, розподіляється, як і спад напруги, пропорційно опорів:

$$P_k = U_k I = I^2 R_k$$

За паралельного з'єднання резистивних елементів (рис. 1.1.7) напруга на кожному з них є однаковою: $U_k = U_i = U$, і тому співвідношення для струмів через такі РЕ відрізняються лише величинами їх опорів:

$$I_k = U/R_k = UG_k$$

Відповідно до першого закону Кірхгофа спільний струм, що протікає через РЕ, які з'єднані паралельно, складається з усіх окремих струмів гілок.

Скоротивши напругу в останньому, одержимо:

$$\begin{aligned} I_{cn} &= \sum_k I_k & \text{або} & \quad U/R_{cn} = \sum_k U/R_k. \\ I/R_{cn} &= \sum_k I/R_k. & \text{або} & \quad G_{cn} = \sum_k G_k \\ I_{cn} &= E/R_{cn} = EG_{cn} \end{aligned}$$

де $G_{cn} = 1/R_1 + 1/R_2$; $R_{cn} = (R_1 R_2)/(R_1 + R_2)$.

Тобто за паралельного з'єднання РЕ їх спільна провідність G_{cn} є сумою провідностей окремих елементів G_k .

Одночасно спільний струм розподіляється між гілками обернено пропорційно їх опорам (прямо пропорційно провідностям):

$$I_k = UG_k G_{cn}/G_{cn} = UG_k/G_{cn} = I_{cn} G_k/G_{cn}$$

Тобто таке з'єднання утворює розподільник струму з коефіцієнтом розподілення спільного струму: $K_d = G_k/G_{cn}$.

Відповідно до струму розподіляється і потужність у колі з паралельним з'єднанням елементів:

$$P_k = U^2 / R_k, \quad P_{cn} = \sum_k P_k.$$

Отже, за паралельного з'єднання РЕ більша потужність розсіюється на меншому опорі, за послідовного – навпаки, на більшому.

Ідеальні джерела напруги (ІДН) та струму (ІДС) як елементи ЕК мають певні особливості: ІДН можуть з'єднуватися між собою тільки послідовно, а ІДС тільки паралельно, відповідно до їх визначення як елементів, що задають певні значення напруги або струму. Вони можуть певним чином і замінюватися одне одним.

Так, ІДН величини E , що послідовно з'єднане з РЕ опорів R_0 , може бути замінено ІДС величини $I=E/R_0$ та паралельно увімкненим із ним РЕ того ж опорів R_0 . У свою чергу, ІДС величини I з паралельно увімкненим РЕ опорів R_0 може бути замінено ІДН величини $E=IR_0$ та послідовно увімкненим із ним РЕ опорів R_0 .

Такі схожі та одночасно протилежні властивості цих джерел називають *дуальними*. Вони легко доводяться.

Для цього розглянемо пару електричних кіл із гілками, одна з яких (R_2) уособлює всю іншу частину ЕК довільної топології (рис. 1.1.8).

Зрозуміло, що пари $E-R_1$ та $I-R_1$ зазначеного ЕК будуть еквівалентні,

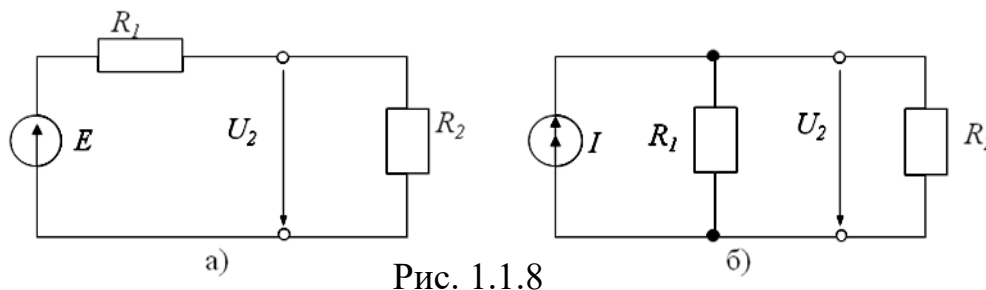


Рис. 1.1.8

Рисунок 1.8

якщо на іншій його ділянці (R_2) напруга U_2 залишиться без зміни за довільних параметрів E, R_1, R_2 .

У першому випадку: $U_{R2} = E R_2 / (R_1 + R_2)$.

У другому випадку: $U_{R2} = U_{R1} = I R_{cn} = I R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$.

Довільні значення U_{R2} збігаються, якщо $E = I R_1$, тобто тоді пари ІДН- R та ІДС- G еквівалентні.

Дуальність властивостей ІДН та ІДС використовується для спрощення розрахунків ЕК й уявлення фізичних процесів у них у разі заміни реальних електричних схем еквівалентними.

1.2 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ГАРМОНІЙНОГО СТРУМУ

1.2.1 Параметри гармонійного коливання

Серед змінних напруг в електротехнічних пристроях найбільш широкое застосування знайшли такі, що за характером зміни миттєвих значень наближаються до синусоїдної функції часу. Завдяки цьому, аналіз електричних кіл змінного струму навіть не гармонічного характеру базується на поданні довільного коливання сумою гармонічних.

Синусоїдне коливання неперервного виду з незмінними параметрами називається гармонійним. Значення синусоїдного коливання в даний момент часу називають його *миттєвим значенням*. Наприклад, миттєва напруга записується виразом:

$$u(t) = U_m \sin(2\pi ft + \varphi_0) = U_m \cos(\omega t + \varphi_0 - \pi/2).$$

Тут вказані основні параметри коливання (рис. 1.2.1):

U_m – амплітуда (найбільше значення напруги (струму) за абсолютною величиною);

φ_0 – початкова фаза;

f – лінійна частота;

$\omega = 2\pi ft$ – кругова (циклічна) частота (рад/с);

$\psi = \omega t + \varphi_0$ – повна фаза (рад).

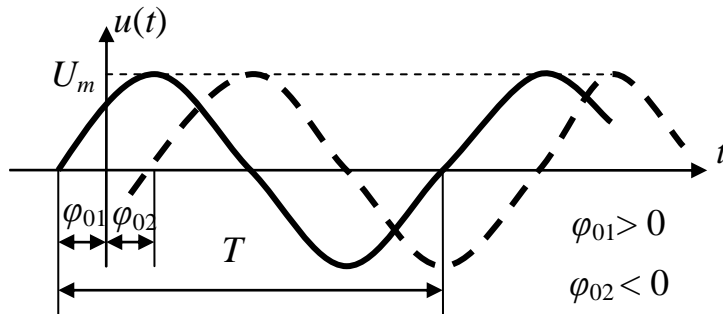


Рис. 1.2.1

Лінійною частотою гармонійного коливання f називається кількість повних коливань за одну секунду. Одиницею вимірювання лінійної частоти в системі СІ є герц (Гц).

Періодом гармонійного коливання T називається час, в інтервалі якого здійснюється одне повне коливання. Одиницею вимірювання періоду в системі СІ є секунда.

Період та лінійна частота гармонійного коливання взаємно виражаються таким співвідношенням:

$$T = \frac{1}{f}.$$

Початкова фаза φ_0 означає певний зсув коливання у часі t_0 відносно початку відліку часу:

Початкова фаза може бути позитивною та негативною:

$\varphi_{01} > 0$ – амплітуда зміщена ліворуч від початку відрахунку.

$\varphi_{02} < 0$ – амплітуда зміщена праворуч від початку відрахунку.

Величина $\psi(t) = \omega t + \varphi_0 = \omega(t + t_0)$ називається повною (миттєвою) фазою коливання.

Два гармонійних коливання, наприклад напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ з однаковою частотою f та відповідними амплітудами U_m , I_m можуть відрізнятися початковими фазами φ_u , φ_i , так що між ними буде відповідний зсув фаз φ

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i.$$

У більшості випадків цікавляться саме зсувом фаз φ , а не початковими фазами коливань.

Крім основних параметрів гармонійної напруги (струму) розглядають додаткові параметри.

Середнє значення періодичного змінного струму (I_c) визначається без урахування знаку (інакше воно нульове), тобто за половину періоду

$$I_c = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin(\omega t) dt = \frac{4I_m}{T\omega} = \frac{2I_m}{T\pi f} = \frac{2I_m}{\pi} \approx 0,637I_m.$$

Діюче значення періодичного змінного струму (I) – значення постійного струму, який на активному опорі за період даної змінної виділяє однакову енергію, тобто це є середнє квадратичне значення за період. Тобто, діюче значення гармонійного струму пов'язано з амплітудним наступним чином:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{I_m^2 T}{2}} \Rightarrow I^2 = I_m^2 / 2 \text{ або } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707I_m.$$

Аналогічно для значення напруги:

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U, \quad U_c = 0,637U_m$$

1.2.2 Комплексне відображення гармонійних коливань та їх векторна діаграма

Аналіз електричних кіл передбачає виконання таких математичних операцій як додавання, множення та ділення відповідних величин. Однак завдяки своїм якостям гармонійні напруги (струми) навіть додаються за правилами тригонометрії. При цьому результат знову є гармонійною функцією тієї ж частоти, але з іншими амплітудами U_{mp} (або I_{mp}) та початковою фазою φ_p , які залежать від співвідношень амплітуд та фазового зсуву коливань, що додаються.

Так, якщо $u_1(t) = U_{m1}\sin(\omega t + \varphi_1)$; $u_2(t) = U_{m2}\sin(\omega t + \varphi_2)$, то

$$u_1(t) + u_2(t) = U_{mp}\sin(\omega t + \varphi_p).$$

Операція тригонометричного додавання значно спрощується, якщо її виконувати у графічній формі. Для цього (рис. 1.2.2) кожне гармонійне коливання можна показати вектором у полярній системі координат "амплітуда U (або I) та повна фаза $\psi(t)$ " – тобто такий вектор має довжину у масштабі величин U_m (або I_m), а його напрям у кожен момент часу відповідає миттєвій повній фазі $\psi(t)$. Тоді результат додавання двох гармонійних величин буде визначатися за правилами додавання векторів та теж відповідним вектором, довжина і напрям якого характеризують амплітуду і миттєву фазу цього коливання. Щоб одержати саме миттєве значення напруги $u(t)$ (або струму) потрібно визначити проекцію цього вектора на вісь декартової системи координат. Проекція U_{mp} на вертикальну вісь дасть миттєве значення U_{mp} , яке змінюється за законом синусу, а на горизонтальну вісь – за законом косинусу. Проекція U_{mp} на вертикальну вісь дасть миттєве значення U_{mp} , яке змінюється за законом синусу, а на горизонтальну вісь – за законом косинусу.

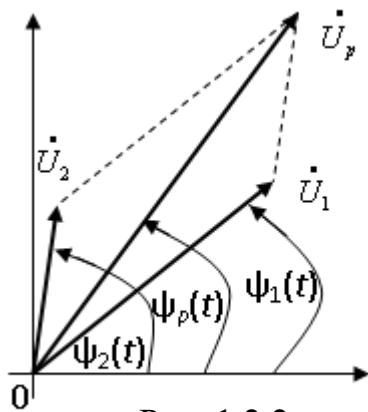


Рис. 1.2.2

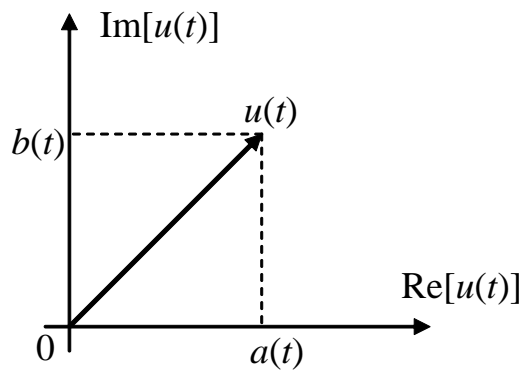


Рис. 1.2.3

Сукупність векторів, які відображають гармонійні синусоїдні струми (напруги) однакової частоти в початковий момент часу називають векторною діаграмою.

Не зважаючи на те, що проекції вектора U або I , що обертається зі сталою кутовою швидкістю ω на обидві вісі є гармонічними функціями часу, за реальне значення (Re) прийнято брати проекцію цього вектора на горизонтальну вісь (напрямок $\varphi = 0$). Вертикальна вісь Im (напрямок $\varphi = \pi/2$) і проекція вектора на неї $b(t)$ називаються уявними (рис. 1.2.3). Таким чином, можна вести мову про векторне відображення гармонійного коливання на комплексній площині Real-Imagene.

При такому комплексному відображенні гармонійних коливань операції над ними зводяться до операцій над комплексними функціями, наприклад.

Так, якщо $u_1(t) = Um_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$; $u_2(t) = Um_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$,

то $u_1(t) + u_2(t) = \text{Re}\{u_1(t) + u_2(t)\}$, то $u(t) \cdot i(t) = \text{Re}\{u(t) \cdot i(t)\}$.

Взагалі, це ще не дає помітних переваг. Вони з'являються при переході до показникової форми запису комплексних функцій

$$u(t) = U_m \cdot \exp\{j(\omega t + \varphi_0)\} = U_m \cdot \exp(j\varphi_0) \cdot \exp(j\omega t).$$

У всіх гармонійних функцій однієї частоти f множник при комплексній формі $\exp(j\omega t)$ однаковий. Цей множник називається "множник обертання". При виконанні арифметичних операцій над гармонійними функціями цей множник не впливає на їх результат:

$$u_1(t) + u_2(t) = [U_{m1} \exp(j\varphi_1) + U_{m2} \exp(j\varphi_2)] \cdot \exp(j\omega t).$$

Тому прийшли до висновку, що при аналізі електричних кіл гармонійного струму множник обертання $\exp(j\omega t)$ може не розглядатися до тих пір, поки не потрібно буде записати вигляд змінної напруги чи струму як функції часу. Відповідно при розрахунках електричних кіл гармонічного струму достатньо оперувати таким комплексним відображенням гармонійної напруги (або струму), що враховує лише його амплітуду U_m та початкову фазу φ_0 , а саме

$$\dot{U}_m = U_m \cdot \exp(j\varphi_0) = U_m e^{j\varphi_0}.$$

Ця комплексна величина \dot{U}_m одержала назву "Комплексна амплітуда гармонійного коливання" (тут – напруги). Спираючись на таке поняття, сума $u_p(t)$ двох коливань однієї частоти буде визначатися наступним чином:

$$\dot{U}_{mp} = \dot{U}_{m1} + \dot{U}_{m2}; \quad u_p(t) = \operatorname{Re}\{\dot{U}_p \exp(j\omega t)\}.$$

Таким чином, при аналізі електричних кіл на комплексній площині достатньо відобразити векторами лише комплексні амплітуди гармонійних напруг та струмів. Таке відображення при сталому режимі роботи електричного кола не буде змінюватись у часі і називається "векторна діаграма напруг та струмів" на комплексній площині.

1.2.3 Комплексний опір та закони проходження струму у комплексній формі

У випадку гармонійної напруги, що діє у вітці лінійного електричного кола, значення напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ змінюється у часі, причому вони можуть мати взаємний фазовий зсув. Тому визначати опір гілки як відношення їх миттєвих значень не має сенсу, оскільки опір є характеристикою кола і не залежить від значень напруги та струму. Якщо ж розглядати відношення комплексних амплітуд \dot{U}_m та струму \dot{I}_m , то це стане комплексне число Z . Його називають *комплексним опором*:

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U_m}{I_m} e^{j\phi} = z(\cos \phi + j \sin \phi) = R + jX.$$

Цей математичний вираз можна розглядати і так:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z}, \quad \dot{U} = \dot{I} Z,$$

що уособлює закон Ома у комплексній формі:

Комплексна амплітуда гармонійного струму гілки електричного кола дорівнює результату ділення комплексної амплітуди напруги на комплексний опір цієї вітки.

Вказані тут складові комплексного опору називаються:

R – активний опір;

X – реактивний опір;

Z – повний опір (модуль комплексного опору)

$$|Z| = U_m/I_m = \sqrt{R^2 + X^2};$$

Ψ – фазовий зсув між напругою та струмом

$$\Psi = \varphi_u - \varphi_i = \operatorname{arctg}(X/R).$$

Зворотню величину до комплексного опору називають комплексною провідністю Y :

$$Y = I_m/U_m = |Y| \exp(-j\Psi) = |Y| \cos\Psi - j|Y| \sin\Psi = g - jb.$$

Вказані тут складові комплексної провідності називаються:

g – активна провідність;

b – реактивна провідність;

Y – повна провідність;

$|Y| = \sqrt{g^2 + b^2}$ – модуль комплексної провідності.

Зауважимо, що складові комплексної провідності можна визначити ще і так:

$$Y = 1/Z = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{Z^2} = \frac{R}{Z^2} - j \frac{X}{Z^2} = g - jb.$$

Оскільки додавання гармонічних величин відповідає додаванню їх комплексних амплітуд, то у комплексній формі справедливі не тільки закон Ома, але й закони Кірхгофа:

$$\sum_n \dot{I}_{mn} = 0$$

Алгебраїчна сума комплексних амплітуд струмів у вузлі дорівнює нулю.

$$\sum_k \dot{E}_{mk} = \sum_p \dot{U}_{mp} = \sum_p \dot{I}_{mp} \cdot Z_p.$$

Алгебраїчна сума комплексних амплітуд ЕРС у довільному контурі дорівнює алгебраїчній сумі комплексних амплітуд напруг на елементах цього контуру.

Подібність формулювання законів проходження струму для комплексних амплітуд та постійного струму дозволяють застосовувати всі відомі методи розрахунків постійного струму для аналізу електричних кіл гармонічного струму. Таке застосування цих законів та принципів називається методом комплексних амплітуд (символічний метод).

Символічний метод передбачає виконання таких дій:

- кожний вектор I розкладається на складові I' та I'' на осях прямокутної системи координат (рис. 1.2.4);

- вісь абсцис називають віссю дійсних значень та позначають знаками „+” і „-”, а вісь ординат називають віссю уявних значень. Складову вектора за уявною віссю виділяють особливим символом j , тому метод називають символічним.

Враховуючи рис. 1.2.4, маємо $I = I' + jI''$:

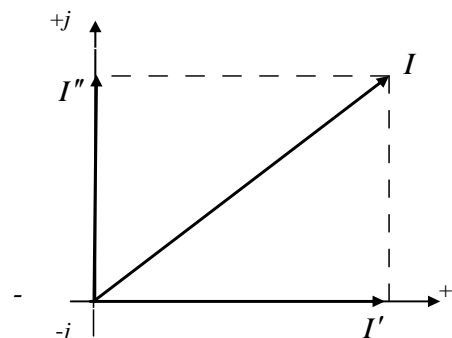


Рис. 1.2.4

- множення кожного вектору на символ j повертає цей вектор на 90° проти годинникової стрілки. Множення на j^2 повертає вектор на 180° , тобто $j^2 \dot{U} = -\dot{U}$, звідки $j = \sqrt{-1}$. Символ j – це уявна одиниця;

- вектор розглядається як величина комплексна на комплексній площині, тому цей метод також має назву *метод комплексних величин*.

Діючі значення у комплексній формі записуються основним літерним позначенням, над яким зверху ставлять крапку. Застосовують три форми запису комплексних величин:

- алгебраїчна форма $\dot{I} = I' + jI''$;

- тригонометрична форма $\dot{I} = I(\cos \varphi + j \sin \varphi)$;

- показникові форма $\dot{I} = Ie^{j\varphi}$.

Для переходу від однієї форми до іншої застосовують співвідношення:

$$I = \sqrt{I'^2 + I''^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{I'}{I''},$$

де I – модуль комплексу; φ – початкова фаза.

1.2.4 Властивості елементів у колі гармонійного струму

Резистивний елемент у колі гармонійного струму

Якщо на синусоїдну напругу $u(t) = U_m \sin \omega t$ увімкнути резистивний елемент (рис. 1.2.5), то у колі виникає миттєвий струм

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t.$$

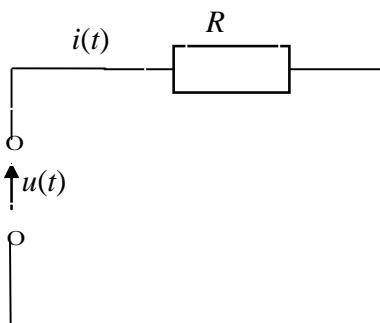


Рис. 1.2.5

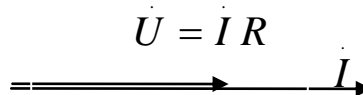


Рис. 1.2.6

Отже, можна зробити висновок, що *струм у колі з активним опором, увімкнутим на синусоїдну напругу, є синусоїдним та збігається з напругою за фазою*. Векторна діаграма такого кола зображена на рис. 1.2.6.

Вектор струму збігається за напрямком із вектором напруги (зсув за фазою дорівнює нулю). Ці дві електричні величини мають дійсне значення.

Закон Ома для такого кола через амплітудні значення, діючі значення та в комплексній формі має вигляд

$$I_m = \frac{U_m}{R}, \quad I = \frac{U}{R}, \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{R}.$$

Необхідно враховувати збільшення опору провідників змінного струму, що пов'язано з явищем витіснення струму на поверхню провідника. Поверхневий ефект враховується введенням коефіцієнта $\xi = \frac{R}{R_0}$, де R_0 – опір провідника постійному струмові, R – опір цього ж провідника змінному струмові.

Ємнісний елемент у колі гармонійного струму

Ємнісний елемент (ємність) – це реактивний пасивний елемент, який здатний накопичувати енергію лише в електричному полі і віддавати її іншим елементам кола без розсіювання.

За вказаними властивостями до такого елемента наближеним є плоский електричний конденсатор з якісним діелектриком та незначними втратами в матеріалі пластин. Одиницею виміру ємності, як відомо, в системі СІ є фарада (Ф).

Одна фарада – ємність елемента, на якому у разі дії електричного заряду в один кулон напруга становить один вольт: $1\text{Ф} = 1\text{Кл}/1\text{В}$. Отже, ємність C пов'язує напругу на елементі з накопиченим зарядом Q . Цей зв'язок визначається виразами

$$Q(t) = C u_c(t) \quad \text{або} \quad u_c(t) = Q(t)/C.$$

Ємність лінійного елемента є сталою величиною, що не залежить ні від часу, ні від електричного режиму (прикладеної до елемента напруги) елемента.

Коли через ємнісний елемент (ЄЕ) протікає струм, то на ньому змінюється заряд $Q(t)$ та напруга. Отже зміна струму, що протікає через даний елемент, визначатиметься формулою

$$i(t) = dQ(t)/dt = C du_c(t)/dt.$$

За цим виразом зміна напруги на ємності визначається формулою

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau.$$

У режимі постійної напруги відповідно до отриманих виразів у будь-який момент часу миттєві значення струму через лінійний ЄЕ дорівнюють нулю. За цих умов ємнісний елемент фактично чинить нескінченний опір протіканню постійного струму і може вважатися розімкненою гілкою.

Якщо напруга на ЄЕ змінюється за гармонійним законом, тобто $u_c(t) = U_m \cdot \cos(\omega t)$, то струм буде визначатись виразом:

$$i(t) = -\omega \cdot C \cdot U_m \sin(\omega t) = -\omega \cdot C \cdot U_m \cos(\omega t - \pi/2) = -\omega C U_m \cdot e^{-j\pi/2} \cos \omega t.$$

Відношення комплексних амплітуди напруги та струму на ЄЕ дорівнюють:

$$\dot{U}_m = U_m \exp(j0); \quad \dot{I}_m = -\omega C U_m \exp(-j\pi/2) = j\omega C U_m.$$

Визначають комплексний опір цього елемента:

$$Z_c = \dot{U}_m / \dot{I}_m = \frac{-1}{\omega \cdot C} \exp(j\pi/2) = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C} = -jX_c.$$

Опір $X_C = -1/\omega C$ [Ом] полягає у протидії ЄЕ протіканню струму за рахунок утворення на ньому напруги $u_c(t)$, причому цей опір зменшується при зростанні частоти гармонійного коливання, а при постійному струмі ($\omega = 0$) є нескінченним (розрив гілки).

Провідність ЄЕ визначається виразами

$$Y_C = 1/Z_C = j\omega C = jb_C; \quad b_C = \omega C.$$

Отже, струм через ємнісний елемент випереджає гармонійну напругу на ньому на чверть періоду (90 гр. кут.), і за рахунок цього активна складова комплексного опору та провідності ЄЕ відсутня (нуль), а опір ЄЕ є суто реактивним.

Як відомо, при паралельному з'єднанні ємностей їх накопичений заряд додається, а тому спільна ємність складатиметься з суми ємностей всіх з'єднаних елементів (рис. 1.2.7):

$$C_{cn} = \sum_n C_n, \quad Z_{cn} = \sum_n Z_{cn}.$$

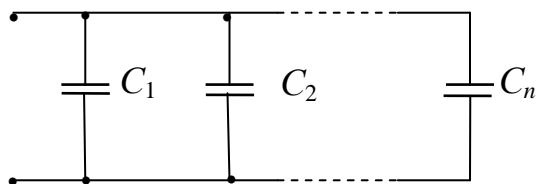


Рис. 1.2.7

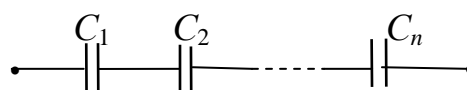


Рис. 1.2.8

При послідовному з'єднанні (рис. 1.2.8) через всі такі елементи протікає однаковий струм, тобто кожна окрема їх ланка одержує однаковий заряд Q . Проте напруги, що спричиняються на ЄЕ, додаються, і тому спільна напруга визначатиметься:

$$U_{cn} = \frac{Q}{C_{cn}} = \sum_n \frac{Q}{C_n} = Q \sum_n \frac{1}{C_n}.$$

Скоротивши на Q , одержуємо, що спільна ємність послідовного з'єднання (рис. 1.2.8) та опір визначатимуться виразами:

$$\frac{1}{C_{cn}} = \sum_n \frac{1}{C_n}, \quad \frac{1}{Z_{cn}} = \sum_n \frac{1}{Z_n}.$$

Індуктивний елемент у колі гармонійного струму

Індуктивний елемент – це такий пасивний реактивний елемент, у якому відбуваються лише процеси накопичення енергії в магнітному полі, пов'язані з проходженням змінного струму, і який здійснює передачу накопиченої енергії іншим елементам без розсіювання. Його умовне зображення пов'язано з реальним радіокомпонентом – котушкою індуктивності. Однак за властивостями до такого ідеалізованого елемента досить наближена тільки високоякісна котушка індуктивності з незначними втратами, проходження змінного струму через яку завжди пов'язане з магнітним потоком Φ , що характеризує магнітне поле в просторі витків котушки. Оскільки кількість ліній магнітного поля (магнітний потік), зчеплених з окремими витками котушки, загалом різна, його поле оцінюють потокозчепленням $\psi(t)$ магнітного потоку з усіма витками ω_S :

$$\psi(t) = \sum_k \Phi_k(t) \omega_{Sk},$$

де $\Phi_k(t)$ – магнітний потік, зчеплений з витками котушки (ω_{Sk}).

Якщо з усіма витками котушки ($\omega_S = \omega_{S1} + \omega_{S2} + \dots + \omega_{Sk} + \dots + \omega_{Sn}$) зчеплений однаковий магнітний потік, то: $\psi(t) = \omega_S \Phi(t)$.

Для лінійного індуктивного елемента (ІЕ) потокозчеплення в будь-який момент часу пропорційне струму. Коефіцієнтом пропорційності такого елемента є параметр L , який і називається *індуктивністю*:

$$\psi(t) = L \cdot i(t).$$

Одиницями вимірювання індуктивності в системі СІ, як відомо, є *Генрі* [Гн]: $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А}$.

Зв'язок між струмом та напругою для ІЕ визначається законом електромагнітної індукції: *внаслідок зміни магнітного потоку, зчепленого з контуром (провідником), через який протікає змінний струм, що спричиняє зміну магнітного потоку, в контурі наводиться ЕРС, яка дорівнює швидкості зміни потокозчеплення і спрямована так, що індукований струм, спричинений нею в контурі, своїм магнітним полем протидіє зміні магнітного потоку, якою зумовлена ЕРС*.

Отже, ЕРС протидіє зміні струму в контурі (провіднику, котушці), що спричиняє зміну магнітного потоку, зчепленого з контуром. Цю протидію розглядають як прояв опору проходження струму, і тому опір ІЕ називають *реактивним*.

Відповідно до закону електромагнітної індукції напруга на ІЕ визначається швидкістю зміни потокозчеплення в часі, а тому після диференціювання за часом виразу для потокозчеплення $\psi(t)$ отримуємо зв'язок між струмом та напругою для лінійного ІЕ

$$u_L(t) = d\psi(t)/dt = L di(t)/dt.$$

Струм же у свою чергу визначатиметься

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L(\tau) d\tau.$$

Нульове значення напруги в будь-який момент часу за відмінних від нуля значень струму означає, що магнітний потік не змінюється, елемент не чинить опору протіканню струму, а отже, поводить себе як короткозамкнена гілка.

Якщо струм через ІЕ є гармонійним, тобто $i(t) = I_m \cdot \cos(\omega t)$, то напруга на ньому становитиме:

$$u_L(t) = L di(t)/dt = -\omega L I_m \sin(\omega t) = -\omega L I_m \cos(\omega t - \pi/2).$$

Відношення комплексної амплітуди напруги на ІЕ $\dot{U}_m = -\omega L \dot{I}_m \exp(-j\pi/2)$ до комплексної амплітуди струму через нього $\dot{I}_m = I_m \exp(j0)$ визначає комплексний опір цього елемента:

$$Z_L = \dot{U}_m / \dot{I}_m = -\omega L \exp(-j\pi/2) = j\omega L = jx_L.$$

Опір $X_L = \omega L$ [Ом] полягає у протидії ІЕ протіканню змінного струму за рахунок утворення на ньому напруги $u_L(t)$, причому цей опір при зростанні частоти гармонійного коливання збільшується, а при постійному струмі ($\omega = 0$) він відсутній.

Провідність ІЕ: $Y_L = 1/Z_L = 1/j\omega L = -jb_L$; $b_L = -1/\omega L$.

Гармонійний струм через індуктивний елемент відстає від напруги на ньому на чверть періоду (90 гр. кут.). За рахунок цього активна складова комплексного опору та провідності ІЕ відсутня ($g = 0$).

Послідовне з'єднання ІЕ збільшує їх спільну індуктивність (якщо ці елементи не пов'язані магнітним полем) – збільшується кількість витків котушки. Тому

$$L_{cn} = \sum_n L_n; Z_{Lcn} = \sum_n Z_{Ln}.$$

Однак при паралельному з'єднуванні ІЕ їх спільна індуктивність зменшується аналогічно, як і при з'єднанні резисторів, і тоді провідності додаються:

$$Y_{cn} = \sum_n Y_n = \sum_n 1/j\omega L_n, 1/L_{cn} = \sum_n 1/L_n.$$

Загалом, порівнюючи між собою індуктивні та ємнісні елементи ЕК, можна помітити наявність як схожості, так і відмінностей у залежностях між струмами та напругами для цих елементів:

$$u_L(t) = L di(t)/dt; \quad i_C(t) = C du_C(t)/dt$$

$$i_L(t) = \int_{-\infty}^t u_L(t) dt; \quad c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_c(t) dt;$$

$$L_{\text{ноchl}} = \sum_n L_n; \quad C_{\text{нар}} = \sum_n C_n;$$

$$\frac{1}{L_{\text{нар}}} = \sum_n \frac{1}{L_n}; \quad \frac{1}{C_{\text{ноchl}}} = \sum_n \frac{1}{C_n}$$

$$Z_L = j\omega L; \quad Y_C = j\omega C;$$

$$Z_C = -j \frac{1}{\omega C}; \quad Y_L = -j \frac{1}{\omega L}.$$

Такі *подібно-протилежні* властивості елементів називаються *дуальними*. Ця дуальність виявляє особливі якості при одночасному вмиканні в електричне коло обох типів таких елементів.

Послідовне з'єднання реактивного та резистивного елементів

При послідовному з'єднанні елементів (рис. 1.2.9) мають місце такі співвідношення для миттєвих значень та комплексів напруг:

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) + u_C(t),$$

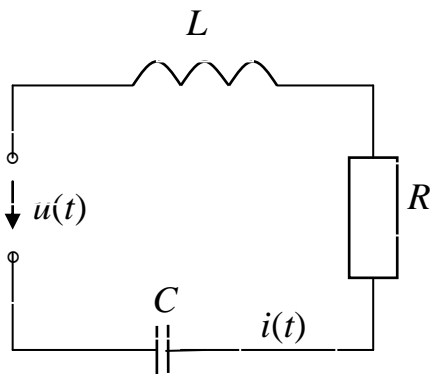


Рис. 1.2.9

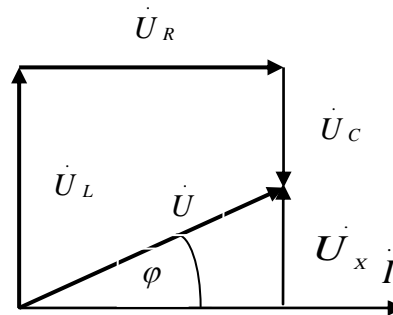


Рис. 1.2.10

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

Оскільки $\dot{U}_R = \dot{I}R$, $\dot{U}_L = j\dot{I}X_L$, $\dot{U}_C = -j\dot{I}X_C$, векторна діаграма має вигляд, наведений на рис. 1.2.10.

Із векторної діаграми можна записати вираз щодо комплексу напруги

$$\dot{U} = \dot{I}[R + j(X_L - X_C)]$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j(X_L - X_C)}.$$

Різницю $X = X_L - X_C$ називають *реактивним опором*, а напругу U_X – реактивною напругою, що в комплексній формі має вигляд

$$jX = j(X_L - X_C), \quad \dot{U}_X = I X.$$

Вирази

$$Z = R + jX, \quad Z = z e^{j\varphi}, \quad Z = z(\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

називають повним опором у комплексній формі. Модуль повного опору можна подати співвідношенням

$$z = \sqrt{R^2 + X^2},$$

а кут між струмом та напругою визначається виразом

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$

Отже, усі індуктивні опори помножуються на символ „+j”, а усі ємнісні опори помножуються на символ „-j”. Із цього випливає, що все коло можна замінити еквівалентним опором. Цей опір складається із дійсної частини (активний опір) та уявної частини (реактивний опір).

Прямокутний трикутник напруг на векторній діаграмі можна перетворити на *трикутник опорів* (рис. 1.2.11). З трикутника опорів випливають такі співвідношення:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad R = Z \cos \varphi, \quad X = Z \sin \varphi,$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R} = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

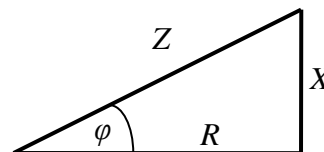


Рис. 1.2.11

Зсув фаз приймається додатнім, коли $\omega L > \frac{1}{\omega C}$

Закон Ома для діючих значень та у комплексній формі нерозгалуженого кола має вигляд:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{Z},$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + jX} = \frac{\dot{U}}{Z}.$$

Паралельне з'єднання реактивного та резистивного елементів

При паралельному з'єднанні елементів (рис. 1.2.12) рівняння, за першим законом Кірхгофа, для миттєвих значень та у комплексній формі мають вигляд:

$$i(t) = i_R(t) + i_L(t) + i_C(t),$$

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C.$$

Використаємо такі позначення для провідностей кола:

g – активна провідність;

b_L – реактивна індуктивна провідність;

b_C – реактивна ємнісна провідність.

Тоді струми можна записати у такому символічному вигляді:

$$\dot{I}_R = g \dot{U}; \quad \dot{I}_L = -jb_L \dot{U}; \quad \dot{I}_C = jb_C \dot{U}.$$

Згідно з першим законом Кірхгофа векторна діаграма має вигляд, наведений на рис. 1.2.13.

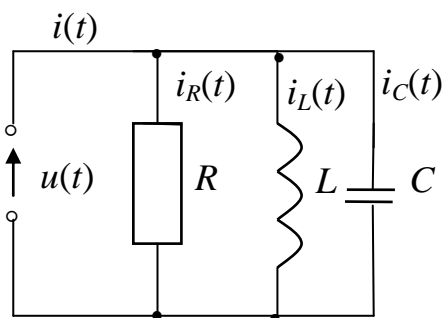


Рис. 1.2.12

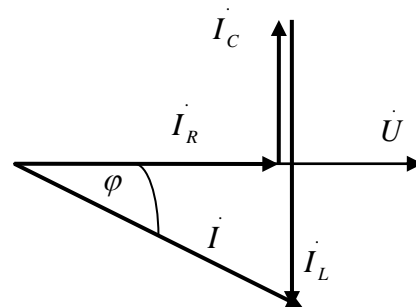


Рис. 1.2.13

Різницю $b = b_L - b_C$ називають реактивною провідністю. У такому випадку повну провідність у комплексній формі можна записати як:

$$\underline{Y} = g - jb = Y e^{-j\varphi} = Y(\cos \varphi - j \sin \varphi),$$

де модуль провідності

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2},$$

а зсув фаз між струмом та напругою

$$\varphi = \arctg \frac{b}{g}.$$

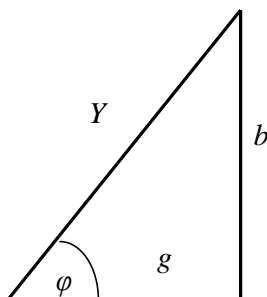


Рис. 1.2.14

Прямокутний трикутник струмів (рис. 1.2.13) можна перетворити на трикутник провідностей (рис. 1.2.14). Із цього трикутника випливають співвідношення:

$$b = Y \cos \varphi, \quad g = Y \sin \varphi.$$

Прямокутний трикутник векторної діаграми дає також співвідношення

$$I = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}.$$

Останній вираз є законом Ома в алгебраїчній формі для розгалуженого кола. Закон Ома у символічному вигляді має форму

$$\dot{I} = Y \dot{U}.$$

Для схеми паралельного з'єднання елементів (рис. 1.2.12) у символічній формі можна записати, що

$$Y = \frac{I}{Z} = g - jb_L + jb_C = \frac{1}{R} + \frac{1}{(jX_L)} + \frac{1}{(-jX_C)},$$

звідки маємо

$$Z = \frac{R(-jX_C)(jX_L)}{R(-jX_C) + (-jX_C)(jX_L) + R(jX_L)}.$$

Розрахунок нерозгалуженого кола символічним методом можна виконувати так само, як і обчислення кола постійного струму.

1.2.5 Трифазні електричні кола

Основні поняття багатофазних електричних кіл

Багатофазною системою електричних кіл називають сукупність електричних кіл, у яких діють синусоїдальні ЕРС однієї і тієї ж частоти, зсунуті одна відносно другої по фазі та створені спільним джерелом електричної енергії.

Фазою багатофазної системи називають одне з електричних кіл, яке входить до складу цієї системи. За кількістю фаз багатофазні системи поділяються на двофазні, трифазні, чотирифазні тощо.

Систему ЕРС, яка діє у багатофазному колі, називають багатофазною системою ЕРС. Для одержання багатофазної системи ЕРС необхідно поміж полюсами постійного магніту помістити систему котушок, які жорстко зв'язані між собою та розміщені під кутом одна відносно другої.

При обертанні цієї системи котушок, у котушках будуть наводитися ЕРС, зміщені одна відносно другої за фазою на певний кут. Припустимо, що між полюсами постійного магніту розміщені два витки (рис. 1.2.5), площини яких створюють кут α . Витки нерухомо скріплені один з одним. При обертанні витків з кутовою швидкістю ω в них індукується ЕРС.

$$e_1(t) = \varepsilon_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1); \quad e_2(t) = \varepsilon_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Оскільки $\varphi_2 = \varphi_1 - \alpha$, то

$$e_1(t) = \varepsilon_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1), \quad e_2(t) = \varepsilon_{2m} \sin(\omega t + \varphi_1 - \alpha).$$

У даному випадку утворюється двофазна система ЕРС.

Розрізняють симетричну і несиметричну системи ЕРС, напруг і струмів. Багатофазна система ЕРС називається симетричною, якщо окремі ЕРС мають однакову амплітуду і відстають за фазою на кути, що дорівнюють

$$\alpha_n = \frac{2\pi}{n}.$$

В n -фазній симетричній системі

$$\varepsilon_{1m} = \varepsilon_{2m} = \dots = \varepsilon_{nm}; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = \frac{2\pi}{n}.$$

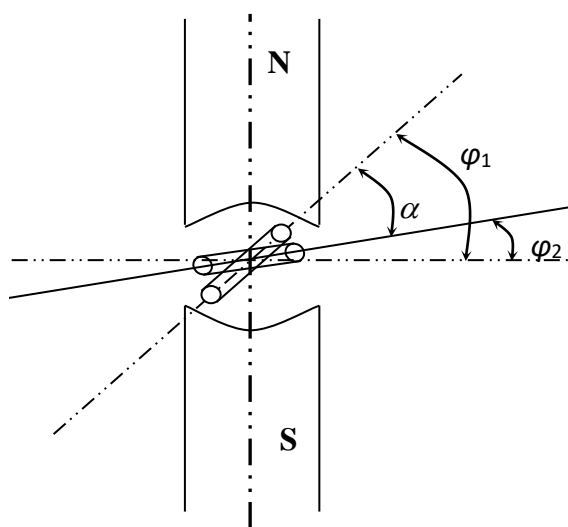


Рис. 1.2.15

Багатофазне електричне коло називається симетричним, якщо комплексні складові його фаз є однаковими. Якщо комплексні складові їх фаз багатофазного кола неоднакові, то багатофазне коло називається несиметричне.

Якщо до симетричного багатофазного кола прикладена симетрична система ЕРС або напруг, то у колі виникає симетрична система струмів.

Багатофазну систему електричних кіл називають незв'язаною, якщо кола, що входять

у цю систему, не мають електричного зв'язку.

Якщо кола багатофазної системи мають між собою електричний зв'язок, то таку систему називають зв'язаною.

Практично застосовують лише зв'язані багатофазні системи, через те, що вони мають істотні переваги порівняно з незв'язаними.

В порівнянні з однофазним, багатофазний струм має дві істотні переваги:

- забезпечує значну економію металу провідника, який передає електричну енергію W від джерела до навантаження (за вагою на 25%);
- дає можливість використовувати прості та надійні у роботі електричні двигуни.

На практиці використовуються системи з різною кількістю фаз, але найбільше розповсюдження знайшли трифазні системи, які далі і будемо розглядати.

Співвідношення між лінійними та фазними величинами у трифазних колах

У трифазній системі електричних кіл, яку скорочено називають трифазною системою або трифазним колом, діють ЕРС:

$$e_1(t) = \varepsilon_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1);$$

$$e_2(t) = \varepsilon_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2) = \varepsilon_{m2} \sin(\omega t + \varphi_1 - \alpha);$$

$$e_3(t) = \varepsilon_{m3} \sin(\omega t + \varphi_1 - \beta).$$

Для симетричної трифазної системи ЕРС $\varepsilon_{m1} = \varepsilon_{m2} = \varepsilon_{m3} = \varepsilon_m$ а кути зсуву фаз між ЕРС дорівнюють 120° . Тоді

$$e_1(t) = \varepsilon_m \sin(\omega t + \varphi);$$

$$e_2(t) = \varepsilon_m \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ);$$

$$e_3(t) = \varepsilon_m \sin(\omega t + \varphi - 240^\circ).$$

ЕРС фаз досягають максимальних значень через одну третину періоду змінного струму один після одного (рис. 1.2.16).

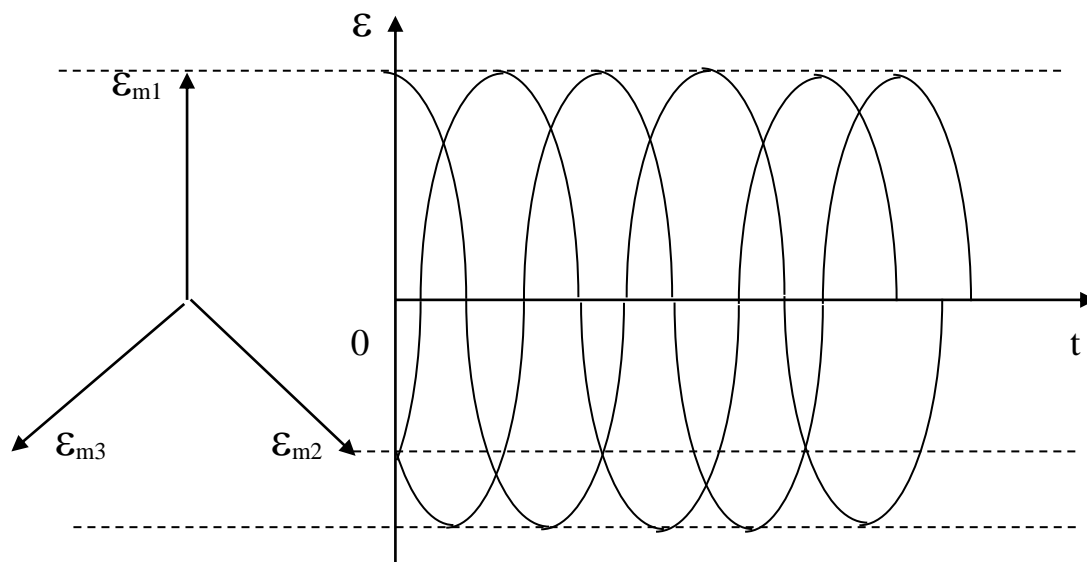


Рис. 1.2.16

Векторна діаграма симетричної трифазної системи ЕРС зображена на рис. 1.2.17. У комплексній формі симетрична трифазна система записується наступним чином:

$$\dot{\varepsilon}_{m1} = \varepsilon_m e^{j\varphi}, \quad \dot{\varepsilon}_{m2} = \varepsilon_m e^{j(\varphi-120^\circ)}, \quad \dot{\varepsilon}_{m3} = \varepsilon_m e^{j(\varphi-240^\circ)},$$

де $\dot{\varepsilon}_{m1}, \dot{\varepsilon}_{m2}, \dot{\varepsilon}_{m3}$ – комплексні амплітуди ЕРС.

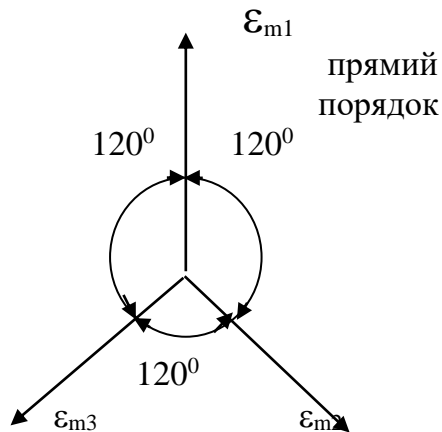


Рис. 1.2.17

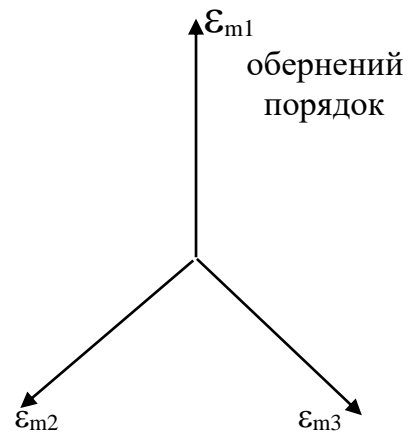


Рис. 1.2.18

У трифазній системі існує поняття порядку проходження фаз. Порядком проходження фаз називають порядок, у якому ЕРС фаз (струму, напруги) досягають додатного максимуму.

На рис. 1.2.17 зображена векторна діаграма трифазної системи з прямим порядком слідування фаз. Векторна діаграма з оберненим порядком слідування фаз зображена на рис. 1.2.18.

Трифазні системи можна зв'язувати за двома схемами: за схемою "зірка" та за схемою "трикутника".

На рис. 1.2.19 зображена незв'язана трифазна система, де

$Z_{на}$, $Z_{нв}$, $Z_{нс}$ – опори фаз навантаження;

$Z_{л}$ – опори проводів ліній;

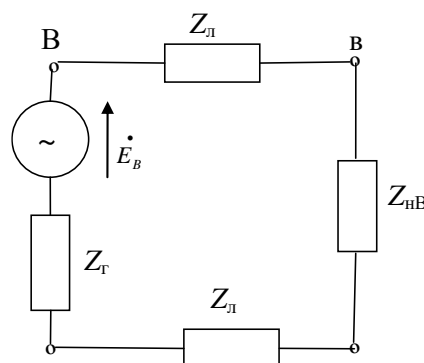
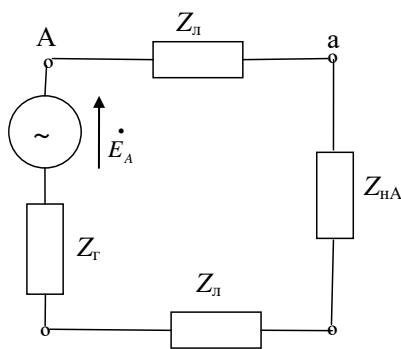
E_A , E_B , E_C – ЕРС фаз генератора;

$Z_{Г}$ – опір фаз генератора;

A , B , C – початок обмоток генератора.

При зв'язуванні цієї системи у зірку об'єднуються немарковані точки фаз генератора (кінці обмоток) та навантаження.

Трифазний генератор з'єднують з навантаженням чотирма лінійними провідниками або трьома (рис. 1.2.20). Загальні точки генераторів 0 та споживачів $0'$ називають нульовими (нейтральними) точками. Провідник, що з'єднує ці точки, називають нульовим або нейтральним.



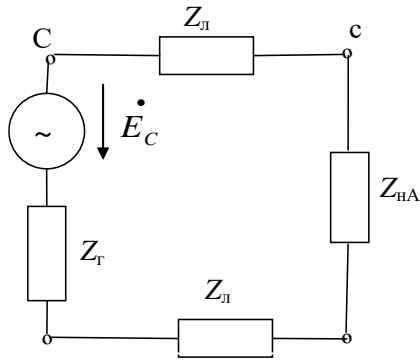


Рис. 1.2.19

Напруги між нейтральними точками і затискачами фаз, а також струми в фазах генераторів і споживачів, називають фазними.

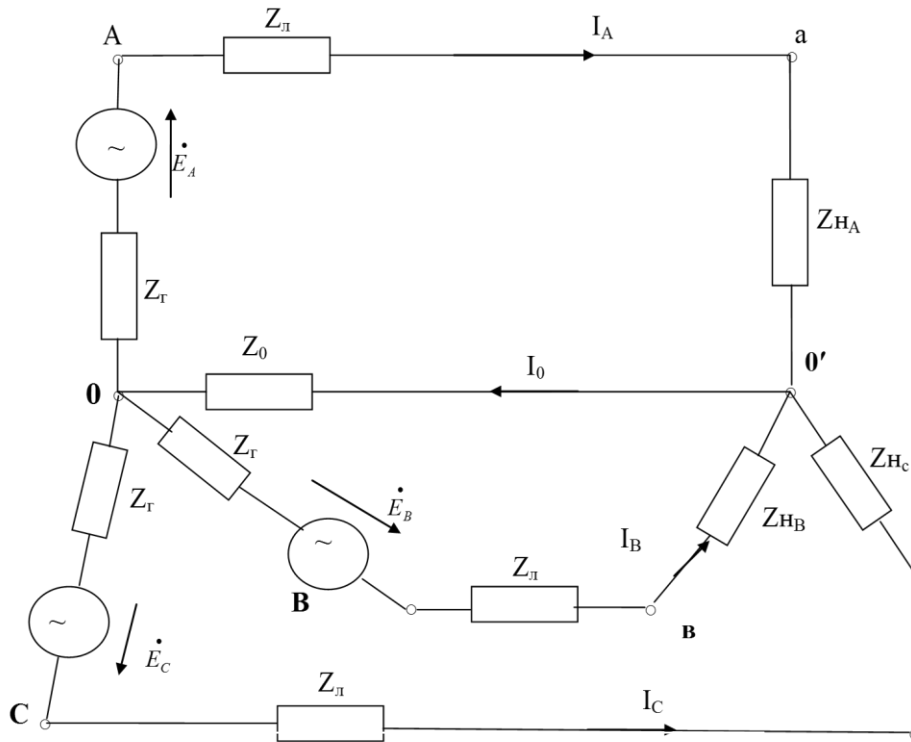


Рис. 1.2.20

Додатні напрямки струмів у лінійних проводах обираються від генератора до навантаження, а у нульовому проводі – від нейтральної точки навантаження до нейтральної точки генератора.

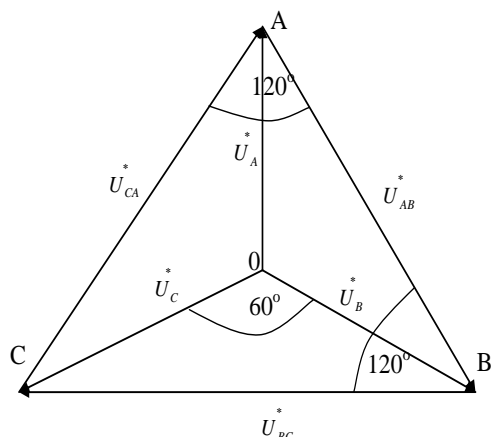


Рис. 1.2.21

Для встановлення залежностей між лінійними та фазними напругами в симетричному трифазному ЕК при з'єднанні фаз навантаження зіркою розглянемо векторну діаграму генератора в режимі холостого ходу (рис. 1.2.21).

Враховуючи, що система симетрична, то

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi,$$

де U_A, U_B, U_C – діюче значення напруг, а

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\lambda,$$

де $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$ – лінійне значення напруг генератора.

Кут між векторами фазових напруг становить 120° . З діаграми витікає

$$\frac{1}{2}U_\lambda = U_\phi \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi, \text{ або } U_\lambda = \sqrt{3}U_\phi;$$

У симетричній трифазній системі при з'єднанні зіркою лінійні напруги у $\sqrt{3}$ разів більші ніж фазні.

Струми у лінійних проводах при з'єднанні зіркою дорівнюють струмам у фазах генератора навантаження:

$$I_\lambda = I_\phi.$$

Якщо система напруг на фазах несиметрична, то при з'єднанні зіркою лінійні напруги визначаються як різниця відповідних фазних напруг. У відповідності з векторною діаграмою

$$U_{AB} = U_A - U_B; U_{BC} = U_B - U_C; U_{CA} = U_C - U_A.$$

З'єднання трикутником може бути отримано, якщо електрично з'єднати початок фази генератора з кінцем іншої його фази так, що утвориться трикутник. Аналогічно з'єднуються фази навантаження (рис. 1.2.22).

Напрямки лінійних струмів, як і у випадку зірки, приймаються від генератора до навантаження.

Струми у фазах навантаження I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} спрямовані за годинниковою стрілкою, тому що для ЕРС генератора прийняті напрями проти годинникової стрілки (рис. 1.2.22). Таке з'єднання фаз генератора та навантаження має назву трикутник-трикутник і позначається Δ - Δ .

З'єднання фаз генератора у трикутник можливо лише при симетрії системи ЕРС генератора в зв'язку з тим, що сума ЕРС фаз генератора дорівнює нулю:

$$\dot{E}_A = E_A; \dot{E}_B = E_A e^{-j120^\circ}; \dot{E}_C = E_A e^{-j240^\circ},$$

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = E_A(1 + e^{-j120^\circ} + e^{-j240^\circ}) = 0.$$

В такому випадку в режимі холостого ходу струму у фазах генератора не буде.

При з'єднанні трикутником напруги на фазах генератора або навантаження дорівнюють лінійним:

$$U_l = U_\phi$$

Використовуючи перший закон Кірхгофа до вузлових точок трикутника навантаження а, в, с (рис. 1.2.22), можна отримати співвідношення між струмами у фазах навантаження і лінійних проводах:

$$I_{lA} = I_{av} - I_{ca};$$

$$I_{lB} = I_{bc} - I_{ab};$$

$$I_{lC} = I_{ca} - I_{bc},$$

де I_{lA}, I_{lB}, I_{lC} - струми у лінійних проводах.

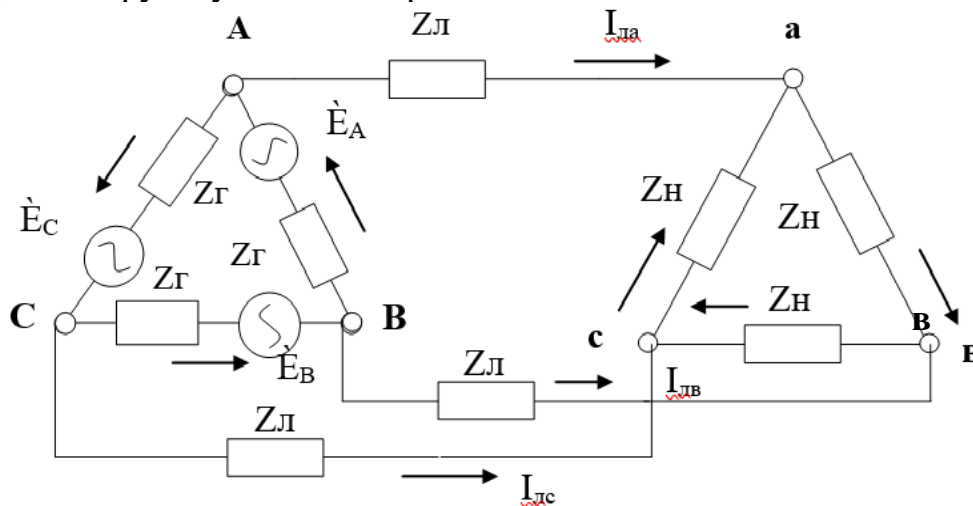


Рис. 1.2.22

При з'єднанні трикутником лінійний струм дорівнює різниці відповідних фазних струмів.

Векторна діаграма струмів трифазної системи, якщо система фазних струмів навантаження симетрична, зображена на рис. 1.2.23.

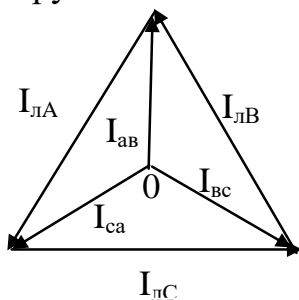


Рис. 1.2.23

Вектори фазних струмів розташовуються під кутом 120° один відносно одного. Тому

$$\frac{1}{2} I_l = \frac{\sqrt{3}}{2} I_\phi \text{ або } I_l = \sqrt{3} I_\phi.$$

У симетричній трифазній системі, що з'єднана трикутником, лінійний струм у $\sqrt{3}$ разів більше фазного.

Приклад. Номінальна напруга фаз приймача енергії $U_n = 220$ В. Його необхідно підключити до трифазної лінії змінного струму з лінійною напругою $U_l = 380$ В. Як необхідно з'єднати фази приймача:

$$\frac{U_l}{U_n} = \frac{380}{220} = \sqrt{3}.$$

Оскільки при з'єднанні зіркою $U_l = \sqrt{3} U_\phi$, то фази приймача повинні бути з'єднані у зірку, тоді

$$U_\phi = \frac{U_l}{\sqrt{3}} \text{ або } U_\phi = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{В} = U_n.$$

Потужність у трифазних колах

Незалежно від способу з'єднання фаз потужність кожної фази джерела або споживача може бути розрахована відповідно до формули

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

де U_ϕ і I_ϕ – фазні значення струму та напруги для відповідної фази; φ_ϕ – кут зсуву фаз між фазними струмами та напругами.

Для джерела ця потужність є корисною, а для споживача – споживчою. Повна потужність джерела (навантаження) дорівнює сумі потужностей всіх трьох фаз:

$$P = P_{\phi 1} + P_{\phi 2} + P_{\phi 3},$$

де $P_{\phi 1}$, $P_{\phi 2}$, $P_{\phi 3}$ – активні потужності окремих фаз.

При рівномірному навантаженні потужності у всіх трьох фазах однакові і тоді

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

Для зручності користування формулою перейдемо до лінійних значень струму та напруги.

При з'єднанні фаз (джерела або навантаження) у зірку можна записати

$$P = 3 \frac{U_l}{\sqrt{3}} I_l \cos \varphi_\phi = \frac{3}{\sqrt{3}} U_l I_l \cos \varphi_\phi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi_\phi.$$

При з'єднанні фаз (джерела або навантаження) у трикутник

$$P = 3U_\phi \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cos \varphi_\phi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi_\phi.$$

Таким чином, у випадку рівномірного навантаження при з'єднанні фаз як у зірку, так і у трикутник активна, реактивна та повна потужності трифазного струму визначається формулами:

$$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi;$$

$$Q = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi;$$

$$S = \sqrt{3}U_l I_l = 3U_\phi I_\phi.$$

1.3 МАГНІТНІ КОЛА

1.3.1 Параметри та характеристики магнітних кіл

Магнітне поле – це один з проявів електромагнітного поля. Воно створюється рухомими електричними зарядами, а також змінним електричним полем.

Графічно магнітне поле зображають магнітними силовими лініями. Їх напрям для провідника з електричним струмом визначають за правилом правого гвинта: якщо поступовий рух гвинта сумістити з напрямом струму, то обертання гвинта покаже напрям магнітних силових ліній. І навпаки: якщо в котушці (витку) напрям струму сумістити з напрямом обертання гвинта, то його поступовий рух покаже напрям магнітного поля.

Магнітні силові лінії є неперервними, тобто не мають ні початку, ні кінця, й утворюють замкнені контури. Це явище називається принципом неперервності магнітного потоку.

Магнітне поле характеризується магнітною індукцією, напруженістю магнітного поля та величиною магнітного потоку.

Магнітна індукція \vec{B} – векторна величина, яка характеризує силу, з якою магнітне поле діє на будь-яку рухому заряджену частинку. Ця сила пропорційна швидкості руху заряду \vec{v} і залежить від його напрямку:

$$\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}].$$

Модуль цієї сили дорівнює скалярному добутку:

$$F = qB \cos \alpha,$$

де \vec{v} – вектор швидкості рухомого заряду;

\vec{B} – вектор магнітної індукції;

α – кут між вектором \vec{v} і площиною, перпендикулярною до магнітних силових ліній.

Нехай заряджена частинка із зарядом $+q$ рухається в магнітному полі зі швидкістю \vec{v} перпендикулярно до магнітних силових ліній (рис. 1.3.1). Тоді на заряд буде діяти сила \vec{F} , напрям якої можна визначити за правилом лівої руки. Тоді магнітна індукція \vec{B} може бути записана як

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{q\vec{v}} \quad \text{або} \quad B = \frac{F}{qv \cos \alpha}.$$

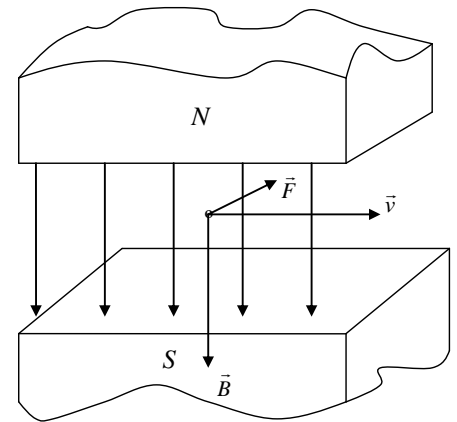


Рис. 1.3.1

Якщо $\alpha = 0$, $q = +1$, $v = 1$, то $|\vec{B}| = |\vec{F}|$, тобто магнітна індукція дорівнює силі, з якою магнітне поле діє на одиничний додатний електричний заряд, що рухається в полі перпендикулярно до магнітних силових ліній з одиничною швидкістю.

Отже, *магнітна індукція* – це векторна величина, спрямована за напрямом магнітних силових ліній (від полюса N до полюса S), що і є дотичною до силової лінії в кожній її точці. Одиницею вимірювання магнітної індукції в системі СІ є тесла (Тл).

Магнітний потік Φ – це потік вектора магнітної індукції через певну поверхню.

Елементарний потік $d\Phi$ крізь елементарну поверхню dS дорівнює

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

а через всю поверхню S дорівнює:

$$\Phi = \oint_S \vec{B}d\vec{S}.$$

Якщо вектор магнітної індукції перпендикулярний до площини S і в усіх її точках має однакове значення, то

$$\Phi = BS.$$

Одиницею вимірювання магнітного потоку є вебер (Вб).

Цей вираз встановлює пропорційність магнітної індукції від магнітного потоку:

$$B = \frac{\Phi}{S}.$$

Напруженість магнітного поля \vec{H} – це вектор, величина якого не залежить від середовища, в якому розглядається магнітне поле, а залежить тільки від величини струму, що створює це поле, та координат точки, в якій визначається \vec{H} .

За відсутності намагніченості середовища (для вакууму) залежність між \vec{B} та \vec{H} встановлюється виразом

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H},$$

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

Напруженість магнітного поля – векторна величина, спрямована за напрямом магнітних силових ліній. Напрямок вектора \vec{H} визначають згідно з правилом правого гвинта відповідно до напрямку струму, який створює магнітне поле.

Після внесення будь-якої речовини в зовнішнє магнітне поле відбувається процес її намагнічування, який характеризується магнітним моментом.

Сумарний магнітний момент одиниці об'єму речовини називається намагніченістю \vec{J} , що визначає стан речовини, набутий нею в результаті намагнічування. Він визначається за виразом $\vec{J} = k\vec{H}$, де коефіцієнт k для феромагнітних речовин залежить від H .

Одиниця вимірювання намагніченості в системі СІ – А/м.

З урахуванням намагніченості

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}) = \mu_0 (\vec{H} + k\vec{H}) = \mu_0 \vec{H} (1 + k).$$

Величина $(1 + k)$ називається відносною магнітною проникністю:

$$\mu_r = 1 + k.$$

Тоді залежність між \vec{B} та \vec{H} матиме вигляд:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_a \vec{H},$$

де $\mu_a = \mu_0 \mu_r$ – абсолютна магнітна проникність даного середовища, для вакууму $\mu_a \approx \mu_0$.

Магнітним колом називається сукупність пристроїв, що мають феромагнітні тіла, електромагнітні процеси в яких можуть бути описані за допомогою понять магніторухійної сили, магнітного потоку та різниці магнітних потенціалів.

Магнітні кола складаються із ділянок із феромагнітними матеріалами, які мають високу відносну магнітну проникність μ_r . Через зміну μ_r магнітні кола є нелінійними.

Розрізняють кола з постійними магнітами і кола, в яких магнітний потік створюється струмом у витках, що намотані на феромагнітне осердя.

Магнітне коло називається нерозгалуженим, якщо в будь-якому його перетині магнітний потік є однаковим. У розгалуженому магнітному колі потоки на різних його ділянках не є однаковими.

1.3.2 Основні закони магнітних кіл

Для розрахунків магнітних кіл використовують два основних закони – закон повного струму та закон Кірхгофа.

Призначення закону повного струму полягає в тому, що він дає змогу за значеннями струмів, що створюють магнітне поле, й координат досліджуваної точки визначити напруженість магнітного поля в даній точці, незалежно від середовища, в якому протікають струми чи розташована ця точка.

Циркуляція вектора напруженості магнітного поля \vec{H} по замкнутому контуру дорівнює алгебричній сумі струмів, які охоплює цей контур, тобто струмові, який протікає через поверхню, що обмежується цим контуром:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum i.$$

Додатний напрям контуру пов'язаний із напрямом електричного струму правилом правого гвинта. В правій частині виразу під величиною i треба розуміти всі струми, які проходять крізь поверхню, обмежену контуром інтегрування l . Суму цих струмів називають повним струмом, тому рівняння називається законом повного струму.

Для ілюстрації запишемо закон повного струму для контуру, що охоплює площину S (рис. 1.3.2):

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \oint_l H dl \cos \alpha = i_1 - i_2 + i_3.$$

Напрямок обходу контуру показано пунктирною лінією. Струми i_0 та i_k не ввійшли до правої частини цього рівняння, тому що вони не охоплюються контуром l .

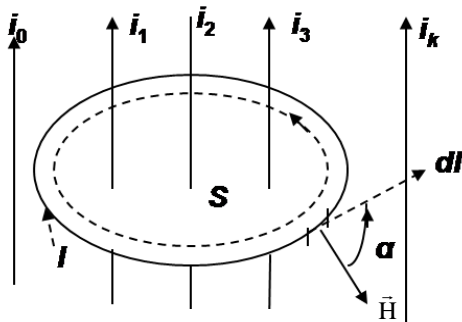


Рис. 1.3.2

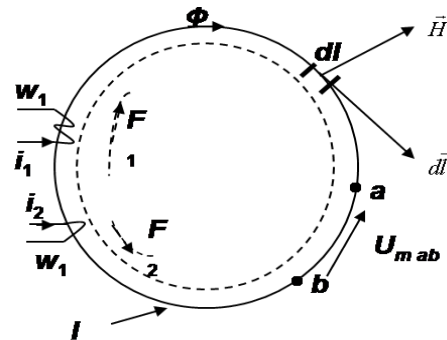


Рис. 1.3.3

Запишемо закон повного струму для контуру l , зображеного на рис. 1.3.3, де струм i_1 охоплюється контуром w_1 разів, а струм $i_2 - w_2$ разів. Враховуючи напрями струмів та напрям обходу, маємо:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = w_1 i_1 - w_2 i_2.$$

Суму струмів, що складає праву частину виразу, називають *магніторушійною силою* (МРС), або намагнічувальною силою, і позначають літерою F .

Магніторушійна сила з числом витків w та струмом i дорівнює $F = wi$ та спрямована стосовно струму за правилом правого гвинта.

Магнітна напруга на ділянці контуру l між точками a і b (рис. 1.3.3) визначається за виразом:

$$U_{Mab} = \int_a^b \vec{H} d\vec{l}.$$

Якщо магнітне поле є однорідним та вектори \vec{H} і \vec{l} збігаються, то

$$U_M = Hl.$$

Одиниці вимірювання магніторушійної сили та магнітної напруги є однаковими і дорівнюють амперам.

Магнітний потік можна обчислити за формулою

$$\Phi = \frac{F}{R_M} = \frac{iw}{R_M}$$

За аналогією з електричним колом цей вираз називають законом Ома для магнітного кола, а величину

$$R_M = \frac{l_c}{\mu_a S}$$

– магнітним опором магнітопроводу довжиною l_c , площиною S та магнітною проникністю μ_a . Одиницею вимірювання магнітного опору в системі СІ є $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$.

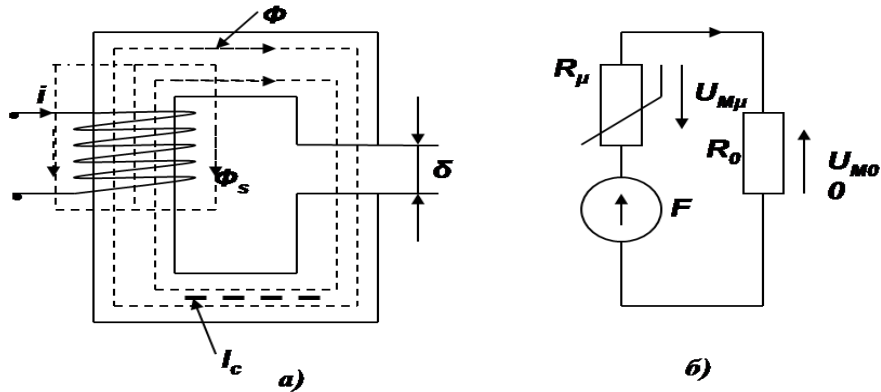


Рис. 1.3.4

На рис. 1.3.4 а зображено магнітне коло з повітряним проміжком δ . Ділянка магнітного кола з феромагнітним осердям має магнітний опір $R_M = \frac{l_c}{\mu_a S}$, а повітряний проміжок

– $R_0 = \frac{l_c}{\mu_0 S}$. Магнітний потік у цьому колі

викликається намагнічувальною силою котушки зі струмом $F = iw$. Основна частина цього потоку Φ замикається по осердю магнітопроводу, а незначна частина – магнітний потік розсіювання Φ_s – по шляху, що проходить чеї

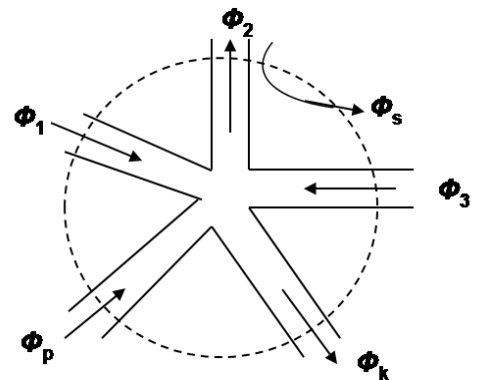


Рис. 1.3.5

по тій частині магнітопроводу, яка безпосередньо прилягає до витків котушки.

На рис. 1.3.4, б зображено еквівалентну схему магнітного кола, аналогічну до схеми електричного кола.

Тут F відповідає ЕРС, Φ відповідає струму I , $U_{M\mu} = R_{\mu} \Phi$, $U_{M0} = R_0 \Phi$ – спади магнітних напруг на феромагнітному магнітопроводі та повітряному проміжку відповідно.

Перший закон Кірхгофа для магнітного кола випливає з принципу неперервності магнітних силових ліній (магнітного потоку). Для замкненої поверхні S , що охоплює певний простір магнітного кола, в якому збігаються магнітні потоки $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$ (рис. 1.3.5) нехтуючи магнітними потоками розсіювання Φ_S (потоками, що замикаються через повітря), можна записати:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = \Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_k + \Phi_p,$$

або в загальному вигляді:

$$\sum_{k=1}^p \Phi_k = 0.$$

Перший закон Кірхгофа для магнітного кола формулюється так: алгебрична сума магнітних потоків, які належать до будь-якого вузла магнітного кола, дорівнює нулю. Наприклад, для вузла a (рис. 1.3.6, a) рівняння за першим законом Кірхгофа записується так:

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

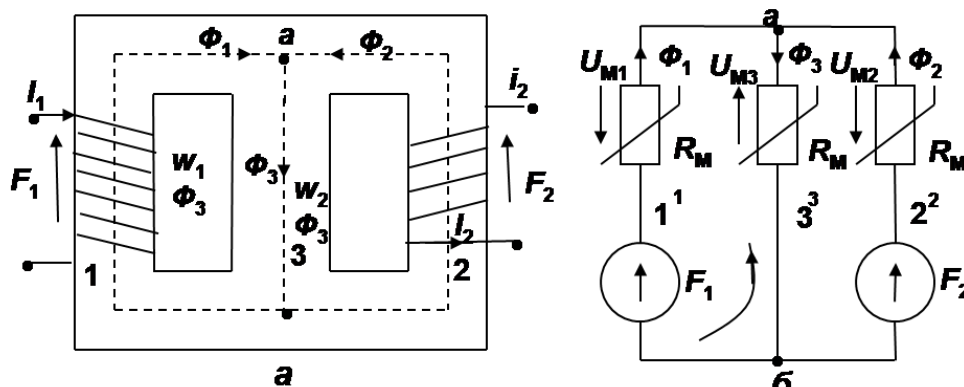
Другий закон Кірхгофа для магнітного кола формулюється так: алгебрична сума спадів магнітних напруг ($R_{Mk} \Phi_k$) на окремих ділянках замкненого контуру дорівнює алгебричній сумі магніторушійних сил ($i_k w_k$), що діють у цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^p R_{Mk} \Phi_k = \sum_{k=1}^p i_k w_k.$$

Цей закон можна сформулювати і так: алгебрична сума магнітних напруг (U_M) і магніторушійних сил (F) у замкненому контурі дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^p U_{Mk} = \sum_{k=1}^p F_k = 0.$$

Еквівалентну схему досліджуваного магнітного кола показано на рис. 1.3.6, б.



Наприклад, для замкненого контуру, утвореного першою та третьою гілками рівняння за другим законом Кірхгофа матимуть вигляд:

$$R_{M1} \Phi_1 + R_{M3} \Phi_3 + i_1 w_1, \quad F_1 - U_{M1} - U_{M3} = 0 \quad \text{або} \quad i_1 w_1 - H_1 l_1 - H_3 l_3 = 0.$$

Спад магнітної напруги на ділянці магнітного кола довжиною l з напруженістю H можна визначити і так:

$$U_M = R_M \Phi = \frac{lB}{\mu_a} = lH.$$

Аналізуючи магнітні кола, розв'язують, як правило, дві задачі – пряму та обернену. Щодо прямої задачі, то задаються геометрія кола, матеріал та магнітний потік. Треба визначити магніторушійну силу. Щодо оберненої задачі, то задаються геометрія кола, матеріал та магніторушійна сила. Слід визначити магнітний потік.

Припускаємо, що магнітне коло є однорідним, коли в усьому колі постійні B і H , тобто на всіх ділянках кола є один матеріал та однаковий переріз. На рис. 1.3.7 наведено однорідне магнітне коло.

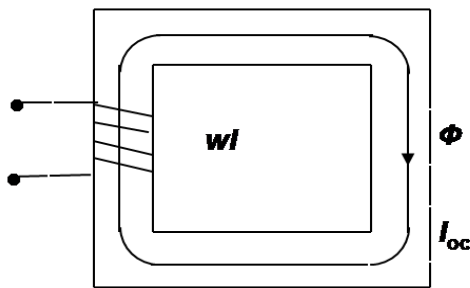


Рис. 1.3.7

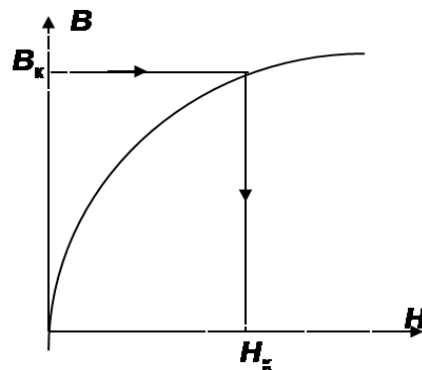


Рис. 1.3.8

Пряму задачу розв'язують таким способом:

– за заданим потоком Φ обчислюють магнітну індукцію

$$B = \frac{\Phi}{S};$$

– за кривою намагнічування визначають напруженість магнітного поля (рис. 1.3.8).

Розв'язування задач до розділу 1.

Задача 1.1. Визначити тип і кількість елементів електричного кола, схема якого наведена на рисунку 1.1. Вказати кількість віток та вузлів схеми.

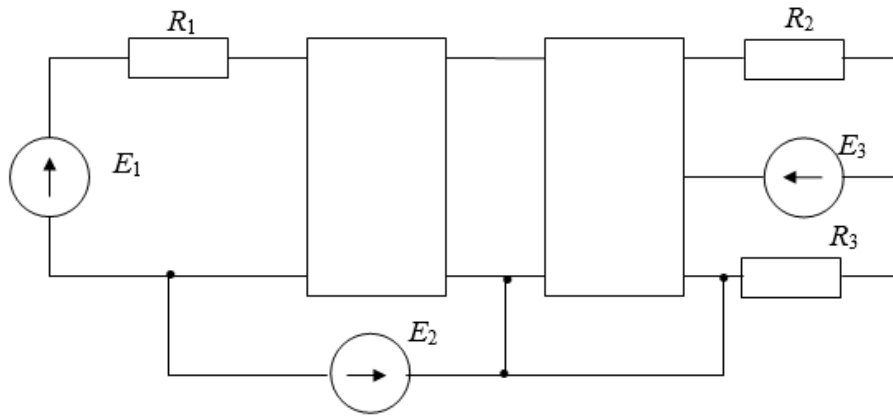


Рисунок 1.1

Розв'язування задачі 1.1

Наведена схема містить три активні двополюсники (E_1 , E_2 , E_3), три пасивні двополюсники (R_1 , R_2 , R_3), один чотиріполюсник і один багатополюсник. Вона характеризується трьома вузлами та 10 вітками.

Задача 1.2. На ділянці електричного кола між точками a і b за певний час пройшов заряд величиною $Q = 50$ Кл. Визначити роботу сил електричного поля за цей час, якщо напруга між цими точками $U_{ab} = 40$ В.

Розв'язування задачі 1.2

За визначенням маємо, що напруга обчислюється кількістю роботи A сил електричного поля, що витрачається на переміщення одиниці позитивного заряду Q з однієї точки в іншу не залежно від конфігурації шляху і обчислюється за формулою:

$$U = \frac{A}{Q}.$$

Задача 1.3. Для схеми електричного кола, показаної на рисунку 1.2, скласти рівняння за законами Кірхгофа.

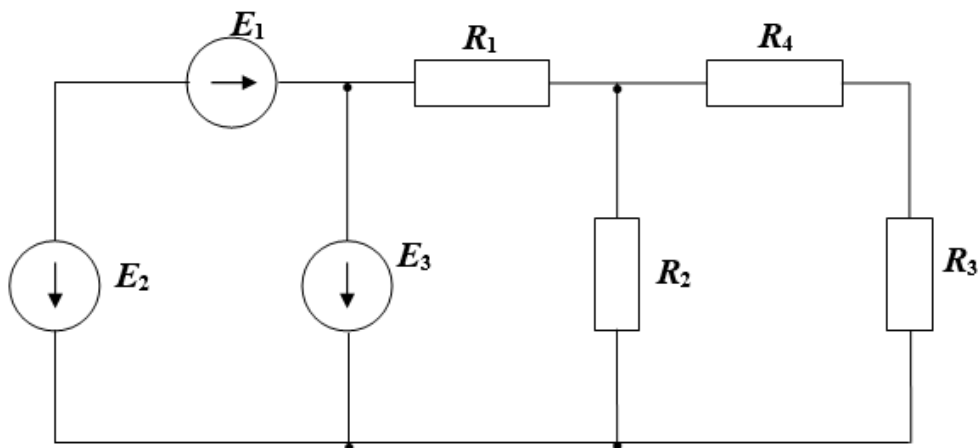


Рисунок 1.2

Розв'язування задачі 1.3

Схема містить три вузли та п'ять віток. Позначаємо вузли та умовно додатні напрями струмів у вітках (рисунок 1.3).

Для кожного з вузлів складаємо рівняння за першим законом Кірхгофа:

- для вузла А $I_1 - I_2 - I_3 = 0$;
- для вузла В $I_3 - I_4 - I_5 = 0$;
- для вузла С $I_2 + I_4 + I_5 - I_1 = 0$.

Задаючись напрямом обходу контурів за годинниковою стрілкою, складаємо рівняння за другим законом Кірхгофа:

- для контуру I $E_1 + E_3 - E_2 = 0$;
- для контуру II $-E_3 = I_3 R_1 + I_4 R_2$;
- для контуру III $0 = (R_4 + R_3) I_5$;
- для контуру IV $E_1 - E_2 = R I_3 + R_2 I_4$;
- для контуру V $-E_3 = R_1 I_3 + (R_4 + R_3) I_4$;
- для контуру VI $E_1 - E_2 = R_1 I_3 + (R_4 + R_3) I_5$.

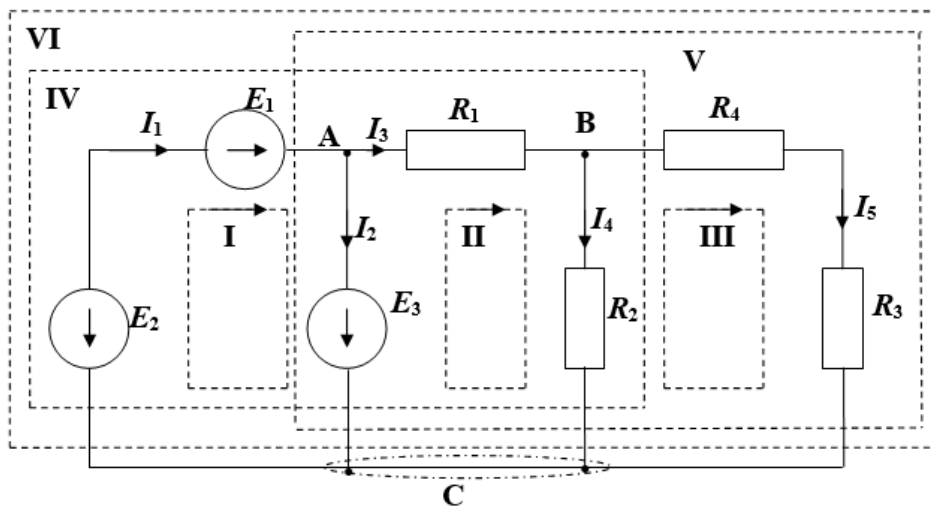


Рисунок 1.3

Задача 1.4. За методом еквівалентного генератора визначити струм I_5 в діагоналі мостової схеми (рисунок 1.4), якщо $E=120$ В, $R_1=60$ Ом, $R_2=15$ Ом, $R_3=90$ Ом, $R_4=60$ Ом, $R_5=12$ Ом.

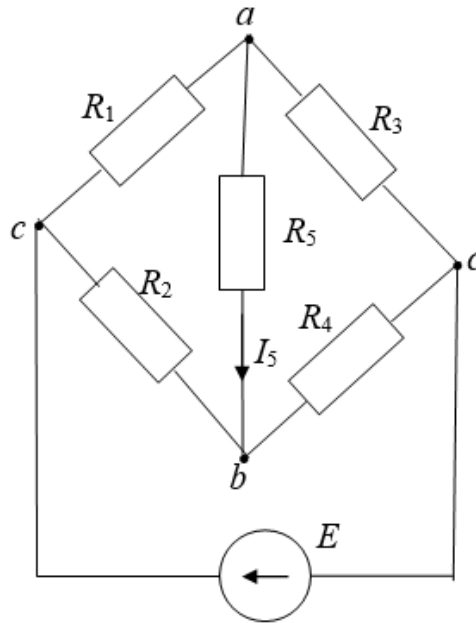


Рисунок 1.4

Розв'язування задачі 1.4

Розімкнемо коло між точками *a* та *б* (рисунок 1.5) і розрахуємо напругу холостого ходу на полюсах розімкненої вітки. Маємо:

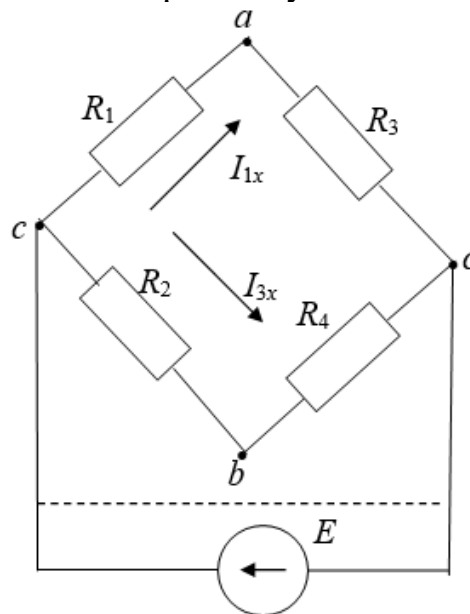


Рисунок 1.5

За законом Ома для ділянки кола визначаємо струми I_{1x} та I_{3x} :

$$I_{1x} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{120}{60 + 15} = 1,6 \text{ А}, \quad I_{3x} = \frac{E}{R_3 + R_4} = \frac{120}{90 + 60} = 0,8 \text{ А}.$$

Тоді $U_{abc} = -1,6 \cdot 60 + 0,8 \cdot 15 = -24 \text{ В}$.

Розрахуємо вхідний опір між т очками *a* та *б*. З цією метою замкнемо джерело електрорушійної сили (на рисунку 5 показано пунктирною лінією). Тоді схема досліджуваного кола приймає вигляд, показаний на рисунку 6, а шуканий опір дорівнює

$$R_{ab} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{60 \cdot 15}{60 + 15} + \frac{90 \cdot 60}{90 + 60} = 48 \text{ Ом.}$$

Нарешті визначаємо шуканий струм

$$I_5 = \frac{U_{abx}}{R_{ab} + R_5} = \frac{-2,4}{48 + 12} = -0,4 \text{ А.}$$

Таким чином струм I_5 спрямований від вузла b до вузла a і дорівнює 0,4 А.

Задача 1.5. Є два геометрично однакових кільцевих осердя у формі кільця. Радіус їх середньої лінії становить $R = 10$ см, а площа поперечного перетину дорівнює $S = 2$ см². Одне осердя виготовлене, наприклад, із дерева, тобто є не феромагнітним, а друге є феромагнітним з кривою намагнічування, показаній на рисунку 1.6. На кожному осерді намотана котушка з $w = 200$ витків. Через ці котушки протікає сталий струм, рівний $I = 1$ А. Визначити магнітні потоки в тілі осердь.

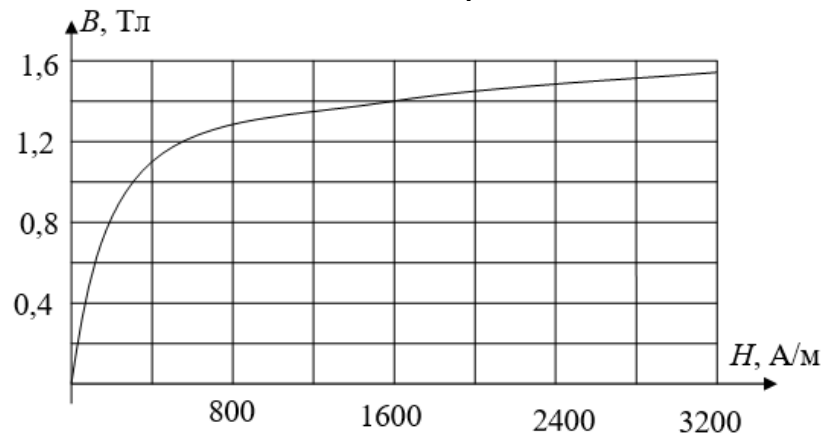


Рисунок 1.6

Розв'язування задачі 1.5

За законом повного струму напруженість поля не залежить від матеріалу і є однаковою в обох осердях, а саме:

$$H = \frac{Iw}{2\pi R} = \frac{1 \cdot 200}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,1} = 318 \text{ А/м.}$$

Магнітний потік у не феромагнітному осерді:

$$\Phi_{нф} = BS = \mu_a HS \approx \mu_0 HS = 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 318 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Вб.}$$

За кривою намагнічування (рисунок 1) знаходимо, що при $H = 318$ А/мм $B \approx 1,02$ Тл.

Магнітний потік у феромагнітному осерді:

$$\Phi_{\phi} = BS = 1,02 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 20,4 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

Таким чином у феромагнітному осерді магнітний потік у 2550 разів більше порівняно із не феромагнітним.

Задача 1.6. За рахунок протікання струму у котушці, яка має 187 витків, в прямокутному осерді існує магнітний потік $\Phi = 7,5 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Товщина та довжина осердя відповідно дорівнюють 25 мм та 39,5 см. Визначити струм у котушці, опір осердя та його магнітну проникність.

Розв'язування задачі 1.6

Оскільки магнітопровід має скрізь однаковий перетин і виконаний з однакового матеріалу, то у будь-якій точці площа перетину осердя $S = \text{const}$ і $\mu_a = \text{const}$. Площа перетину осердя

$$S = 0,25 \cdot 0,25 = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Магнітна індукція буде дорівнювати

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{7,5 \cdot 10^{-4}}{6,25 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Тл.}$$

За таблицею характеристик намагнічування матеріалів знаходимо, що при такій магнітній індукції напруженість магнітного поля становить $H = 1300 \text{ А/м}$.

За законом повного струму визначаємо силу намагнічування котушки I

$$Iw = Hl_{oc} = 1300 \cdot 0,395 = 513,5 \text{ А} \cdot \text{витків.}$$

Звідси, струм дорівнює

$$I = \frac{Hl_{oc}}{w} = \frac{513,5}{187} = 2,74 \text{ А.}$$

Опір магнітного кола буде дорівнювати

$$R_m = \frac{U_m}{\Phi} = \frac{Hl_{oc}}{BS} = \frac{1300 \cdot 0,395}{1,2 \cdot 6,25 \cdot 10^{-4}} = 6,85 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн.}$$

Контрольні питання

1. Дати визначення елементів ЕК.
2. Дати визначення топологічних елементів ЕК (гілка, вузол, контур).
3. Записати закони проходження електричного струму (закони Ома та Кірхгофа).
4. Навести властивості з'єднань елементів електричних кіл.
5. Навести параметри гармонійного коливання.
6. Поясніть властивості реактивних елементів у колі гармонійного струму.
7. Навести параметри трикутника опорів у колі гармонійного струму на векторній діаграмі.
8. Навести співвідношення між лінійними та фазними величинами у трифазних колах.
9. Навести параметри та характеристики магнітних кіл.
10. Записати основні закони магнітних кіл.

Розділ 2

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1.1 Принцип дії машини постійного струму

Основним типом машини постійного струму є колекторний тип. Розглянемо процес роботи найпростішої машини постійного струму колекторного типу (рис. 2.1.1) у режимі генератора. Між двома полюсами постійного магніту (N і S) поміщена обертова частина машини — якорь. Для обертання якоря використовується механічна сила первинного двигуна, наприклад турбіни чи двигуна внутрішнього згоряння. Якорь машини

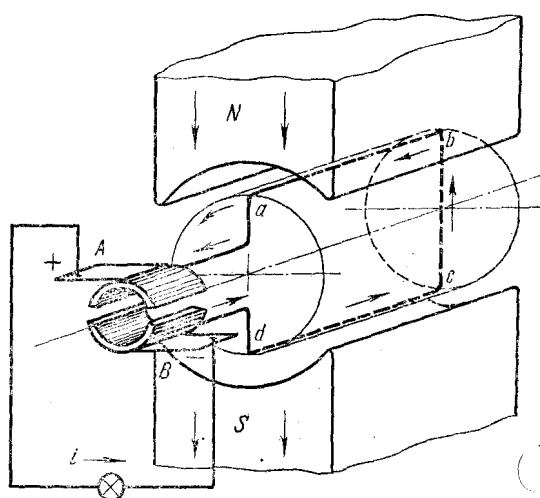


Рис.2.1.1

складається зі сталевого циліндра, на якому розташована обмотка у вигляді витка $abcd$, кінці витка приєднані до двох пластин (півкільцям), закріплених на валу й ізольованими одна від одної. Ці пластини утворюють важливу частину машини — колектор. До щіток A і B приєднане навантаження генератора. У процесі роботи машини колектор обертається разом з валом, а щітки A і B залишаються нерухомими.

Припустимо, що якорь генератора обертається проти руху годинникової стрілки, тоді в провідниках обмотки

якоря індукуються ЕРС, напрямок якої зазначений на рисунку стрілками. Миттєве значення цієї ЕРС для одного провідника обмотки визначається формулою

$$e = Blv.$$

Активна довжина провідника — величина незмінна, а тому якщо швидкість руху якоря в процесі роботи генератора залишається незмінною, то у формулі добуток буде постійною величиною ($const$).

$$e = const \cdot B.$$

Ця формула показує, що величина і напрямок ЕРС обмотки якоря визначаються винятково значенням магнітної індукції B у повітряному зазорі між якорем і полюсами. Але розподіл магнітної

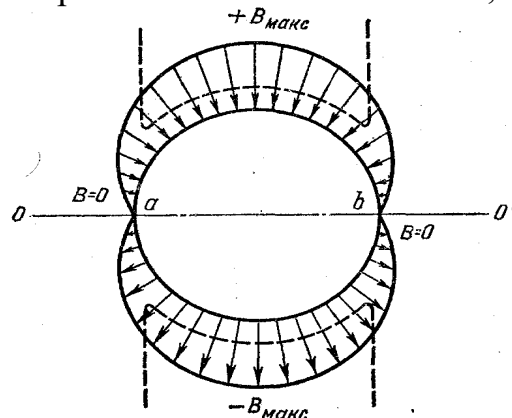
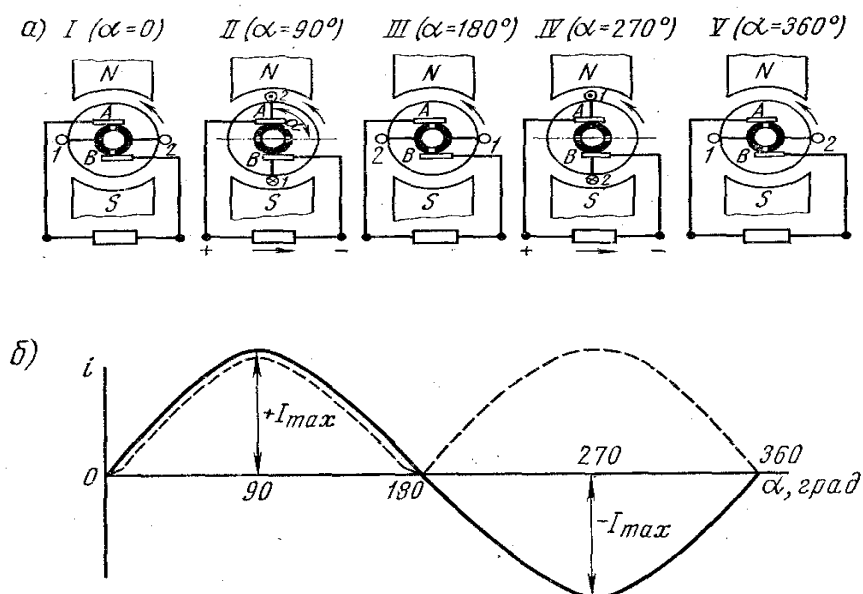


Рис. 2.1.2

індукції в повітряному зазорі генератора в різних місцях по колу якоря нерівномірний: під серединою полюсів індукція B має максимальні значення (під північним полюсом позитивне, під південним – негативне); ближче до країв полюсів індукція зменшується (рис. 2.1.2). Лінія $00'$ на рис.2.1.2, що розділяє зони магнітних полюсів і проходить через центр якоря, називається геометричною нейтраллю. Магнітна індукція на геометричній нейтралі (точки a і b) дорівнює нулю. У процесі роботи генератора якір обертається і провідники його обмотки по черзі займають положення в магнітному полі з різними значеннями магнітної індукції, а тому в обмотці якоря генератора наводиться змінна ЕРС. При цьому графік зміни ЕРС залежно від часу відповідає діаграмі розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі. Так, наприклад, при синусоїдальному характері розподілу магнітної індукції ЕРС, а отже, і струм в обмотці якоря також синусоїдальний. Якби в машині не було колектора, то струм у зовнішньому ланцюзі генератора був би змінним. Але за допомогою колектора і щіток A і B змінний струм обмотки якоря перетворюється в пульсуючий струм, тобто струм, незмінний по напрямку. При зображеному на рис. 2.1.1 положенні витка $abcd$ струм по зовнішньому ланцюзі генератора спрямований від щітки A до щітки B .

Після того як якір повернеться на 180° , напрямок струму в витку зміниться на зворотний. Однак полярність щіток, а отже, і напрямок струму в зовнішній частині ланцюга залишаються незмінними. Пояснюється це тим, що в той момент, коли струм у витку змінює свій напрямок, відбувається зміна колекторних пластин під щітками. Таким чином, під щітками A завжди знаходиться пластина, з'єднана з провідником, розташованим під північним полюсом, а під щіткою B — пластина, з'єднана з провідником, розташованим над південним полюсом.

Керуючись тим, що у зовнішній частині ланцюга струм спрямований від позитивного затиску до негативного, визначаємо полярність щіток: щітка A має полярність «плюс», а щітка B — «мінус».



У результаті полярність щіток у процесі роботи генератора залишається незмінною, незалежно від положення витка в магнітному полі. Завдяки цьому електричний струм у зовнішньому ланцюзі генератора стає незмінним по напрямку. Що ж стосується величини цього струму, то вона залишається змінною: при положенні провідників обмотки під серединою полюсів струм має максимальне значення, а при положенні їх на геометричній нейтралі струм дорівнює нулю. Це видно на рис. 2.1.3, *а*, де показані різні положення якоря генератора за один оборот, і рис. 2.1.3, *б*, на якому зображені графіки ЕРС і струму в обмотці якоря і в зовнішньому ланцюзі генератора. Таким чином, за допомогою колектора в генераторі постійного струму відбувається перетворення змінного струму в обмотці якоря в пульсуючий струм у зовнішній ділянці ланцюга.

Пульсації струму в зовнішньому ланцюзі генератора можна зменшити, якщо застосувати обмотку якоря з декількох витків, кожний з яких приєднаний до відповідної пари колекторних пластин. Так, наприклад, при розташуванні на якорі двох витків, зрушених у просторі під кутом 90° , пульсації струму помітно зменшуються, а при 16 витках стають практично непомітними і струм у зовнішньому ланцюзі генератора можна вважати постійним.

2.1.2 Будова електричних машин постійного струму

Промисловістю виготовляються електричні машини постійного струму, призначені для роботи в різних умовах. Тому окремі вузли машин можуть мати різну конструкцію, але загальна конструктивна схема цих машин однакова (рис. 2.1.4).

Машина постійного струму (МПС) складається з нерухомої частини — статора й обертової частини — якоря, розділених повітряним зазором. Статор складається зі станини, на внутрішній поверхні якої кріпляться головні й додаткові полюси з обмотками. Головні полюси служать для створення в машині основного магнітного потоку, а додаткові — для поліпшення комутації.

Якір машини постійного струму складається з вала, осердя, обмотки й колектора. Кінці вала перебувають у підшипниках, розташованих у підшипникових щитах. Для кращого охолодження в більшості машин є вентилятор.

На рис. 2.1.5 показана будова електричної машини постійного струму.

Станина. Станина машини постійного струму служить для кріплення полюсів і підшипникових щитів. Крім того, станина є магнітопроводом, тому що через неї замикається основний магнітний потік машини. Тому

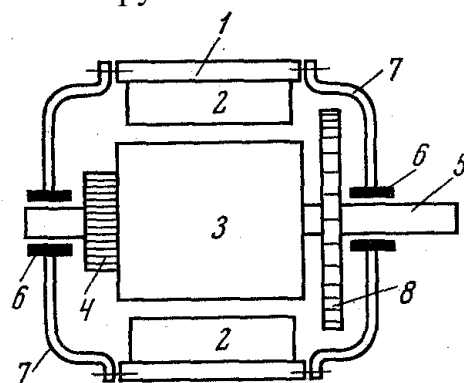


Рис. 2.1.4.

станини машин постійного струму виготовляються зі сталі — матеріалу, що має достатню механічну міцність і велику магнітну проникність. Для кріплення машини до фундаменту станина має відлиті чи приварені лапи з отворами для болтів. По колу станини є отвори для кріплення головних і додаткових полюсів. У верхній частині станина має піднімальне кільце (рим-болт), що служить для підйому машини при її зборці і монтажі. У машинах малої і середньої потужності станина являє собою цільну

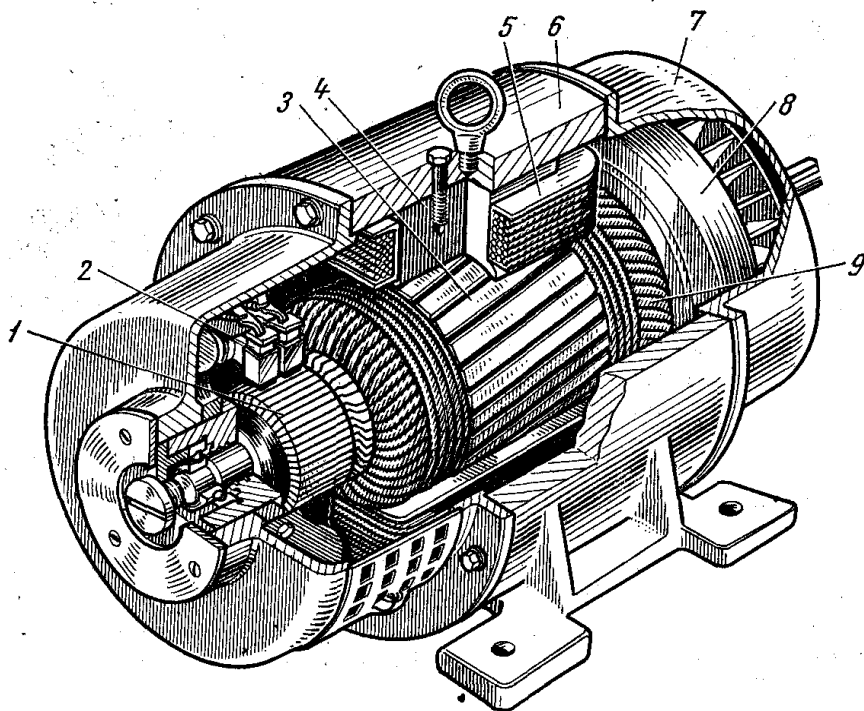


Рис. 2.1.5

конструкцію у виді сталевий виливки чи зварену з листовий сталі. У великих машинах станини роблять рознімними, що полегшує їхній монтаж і транспортування.

Головні полюси. Магнітне поле в машині постійного струму створюється силою намагнічування обмотки збудження, що виконується у вигляді полюсних котушок, надягнутих на осердя головних полюсів (див. рис. 2.1.6, а). З боку, оберненого до якоря, осердя закінчується полюсним наконечником, за допомогою якого забезпечується необхідний розподіл магнітного потоку на поверхні якоря.

Осердя головних полюсів виготовляють у вигляді пакетів сталевих листів товщиною от 1 до 2 мм. Пакет пресують і стягають шпильками. Такою конструкцією досягається зменшення вихрових струмів в осерді полюса, виникнення яких пояснюється зміною (пульсацією) магнітної індукції в полюсних наконечниках при обертанні якоря, що має зубцювату поверхню.

Полюси кріпляться до станини болтами чи шпильками. Поліусні котушки виконуються з мідного проводу, намотаного на каркас з ізолюючого матеріалу. Іноді котушку поділяють по висоті на кілька частин, між якими

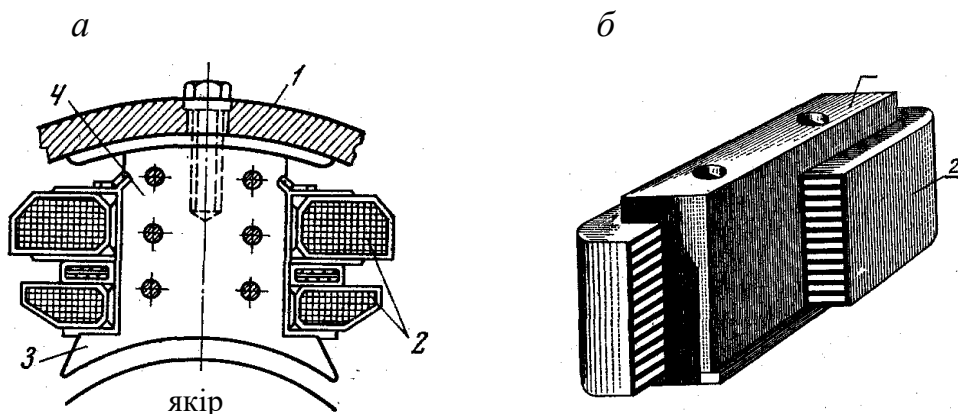


Рис.2.1.6

залишають вентиляційні канали. Така конструкція забезпечує краще охолодження котушки.

Додаткові полюси. Додаткові полюси застосовують у машинах потужністю понад 1 кВт із метою зменшення іскріння на щітках.

Додатковий полюс (рис. 2.1.6, б) складається із осердя 1 і котушки 2, виконаної з мідного ізолюваного проводу з перерізом, розрахованим на робочий струм машини, тому що котушки додаткових полюсів включаються послідовно з обмоткою якоря. Осердя додаткового полюса виготовляється зі сталі і має, як правило, монолітну конструкцію. Через малу величину магнітної індукції в осердді додаткових полюсів у них практично не індукуються вихрові струми. Додаткові полюси встановлюють посередині між головними полюсами і кріплять до станини болтами.

Якір. Якір машини постійного струму складається з вала, осердя, обмотки і колектора. Осердя якоря (рис. 2.1.7) являє собою циліндр, набраний зі штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 чи 0,5 мм. Листи ізолюють один від одного лаком чи папером і збирають у загальний пакет, що насаджується на вал якоря. Пакет утримується в стиснутому стані натискними шайбами. Така конструкція осердя якоря дає можливість зменшити втрати енергії в ньому від дії вихрових струмів, що виникають у результаті перемагнічування осердя при обертанні якоря в магнітному полі. Для кращого охолодження машини як правило в осердді якоря влаштовують вентиляційні канали для охолоджуючого повітря. На поверхні осердя є подовжні пази, у які вкладається обмотка якоря.

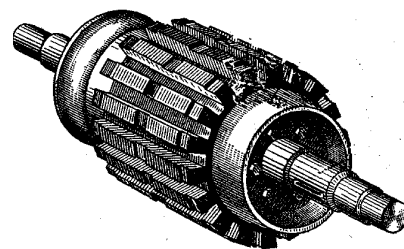


Рис.2.1.7

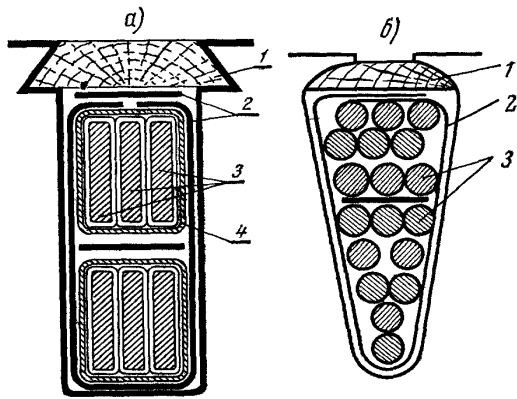


Рис.2.1.8

Обмотку якоря виконують з мідного проводу круглого чи прямокутного перетину і розташовують у пазах осердя якоря, де вона ретельно ізолюється від осердя. Пази осердя якоря можуть бути відкритими (рис. 2.1.8, а) і напівзакритими (рис. 2.1.8, б). Відкриті пази застосовують у машинах середньої і великої потужності, а напівзакриті в машинах малої потужності.

Обмотка якоря складається із секцій, кінці яких припаюються до пластин

колектора.

Для міцного закріплення проводів обмотки якоря в пазах застосовуються дерев'яні, гетинаксові чи текстолітові клини. Застосування дерев'яних клинів не забезпечує надійного кріплення, тому що при висиханні вони слабшають і можуть випасти з паза. У машинах малої потужності пази не заклинюються, а прикриваються зверху бандажем. Для того щоб бандаж не виступав за межі якоря, місце під бандаж роблять трохи меншим за його діаметр (див. рис. 2.1.7).

Бандаж виконується зі сталевого чи бронзового дроту, намотаного безпосередньо на сталь якоря.

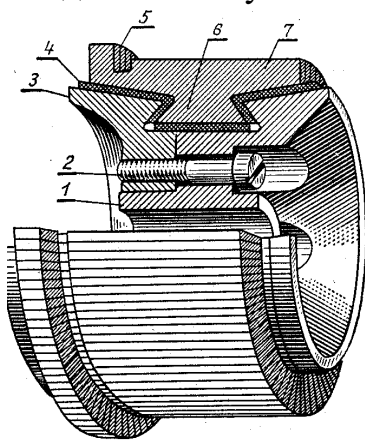


Рис.2.1.9

Лобові частини обмотки кріпляться до обмоткотримача також за допомогою дротового бандажа.

Колектор машини (рис. 2.1.9) виконують із пластин холоднокатаної міді (колекторна мідь), та ізолюють одну від одної прокладками з колекторного міканіту. Виступаючу частину колекторної пластини називають «півником», до неї припаюють провід обмотки якоря. Нижні краї пластини мають форму «хвоста ластівки». Після

зборки колектора ці краї виявляються затиснутими між двома натискними шайбами, ізольованими від колекторних пластин міканітовими конусами і циліндрами. Щоб міканітові прокладки при спрацьовуванні пластин колектора не виступали над пластинами, що викликало б вібрацію щіток, іскріння і передчасний знос щіток, між колекторними пластинами фрезерують пази (доріжки) на глибину до 1,5 мм.

Колектори електричних машин малої потужності часто виконуються шляхом запресовування мідних пластин у пластмасу. Пластмаса в цьому випадку є скріпним та ізолюючим матеріалом. Така конструкція колектора проста у виготовленні, але може застосовуватися лише при швидкості обертання до 10000 об/хв.

Щітковий пристрій. Для одержання електричного контакту з поверхнею колектора в машині постійного струму є щітки. Для установки щіток у машині служить щітковий пристрій, що складається з щіткової траверзи (рис. 2.1.10), пальців, щіткотримачів (рис. 2.1.11).

Щіткова траверза, як правило, кріпиться до підшипникового щита, і тільки в машинах великої потужності вона кріпиться до станини. Між щітковою траверзою і пальцями є ізоляція. На кожен палець встановлюють комплект щіткотримачів. Число пальців, як правило, дорівнює числу головних полюсів у машині. Щіткотримач (рис. 2.11) складається з обойми 4, у яку поміщають щітку 3, курка 1, що являє собою відкидну деталь, яка передає тиск пружини 2 на щітку. Кріплення щіткотримача на пальці здійснюється за допомогою затискача 5. Для приєднання елементів електричного ланцюга машини до щітки остання забезпечується гнучким тросиком 6. Усі щіткотримачі однієї полярності з'єднують між собою збірними шинами, приєднаними до виводів машини.

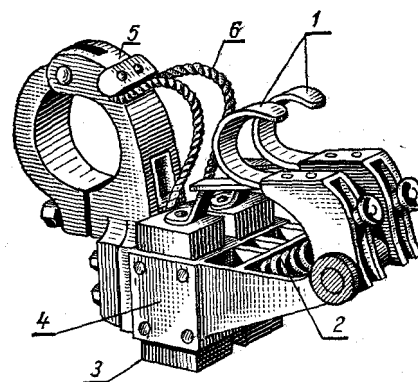
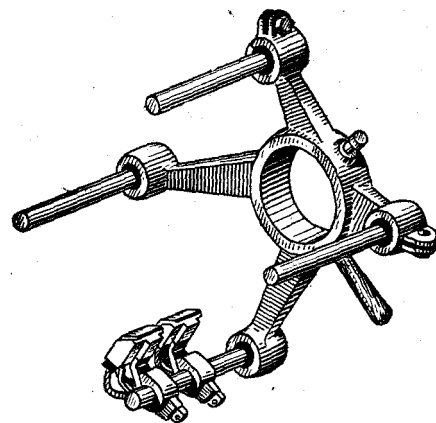


Рис.2.1.11

Однією з умов безперебійної роботи електричної машини є щільний і надійний контакт між щіткою і колектором. Отже, щітковий пристрій є відповідальним вузлом машини: щітка повинна мати надійний контакт із колектором, тиск на щітку повинен бути відрегульований, тому що надмірний натиск може викликати передчасний знос щітки і перегрів колектора, а недостатній натиск - іскріння на колекторі.

Крім зазначених частин, машина має два підшипникових щити: передній (з боку колектора) і задній. Щити за допомогою болтів кріпляться до станини. У центральній частині щита присутнє розточення, де розташовується підшипник. Як правило, в машинах застосовуються кулькові чи роликові підшипники котіння.

Для приєднання обмоток машини до електричної мережі машина забезпечується коробкою виводів, де на ізоляційній панелі робляться виводи кінців обмоток. Звичайно панель з виводами розташовують на станині, а в деяких машинах малої потужності — на передньому підшипниковому щиті.

Виводи обмоток машин постійного струму, відповідно до ДСТУ, позначаються таким чином:

Обмотка якоря	Я1 і Я2
Обмотка додаткових полюсів	Д1 і Д2
Обмотка компенсаційна	КО1 і КО2
Обмотка збудження паралельна (шунтова)	Ш1 і Ш2
Обмотка збудження послідовна (серієсна)	С1 і С2

Цифрою 1 позначено початок обмоток, а цифрою 2 — кінець.

Електромашинні будівельні заводи випускають велику кількість машин постійного струму різних типів та призначення.

Заводи виготовляють машини постійного струму серії П, потужністю від 0,13 - 200 кВт. В серії П прийнята шкала потужності з коефіцієнтом нарощування, який близький до 1,25.

Електродвигуни цієї серії розраховані на номінальні напруги 220, 380 В і номінальні швидкості обертання 600, 750, 1000, 1500, 2200 та 3000 об/хв, а генератори на номінальні напруги 230, 390 В та номінальні швидкості обертання 970, 1450 та 2850 об/хв.

Електродвигуни серії П призначені для використання в електричних приводах, які вимагають широкого та плавного регулювання швидкості обертання, а генератори — для живлення мереж постійного струму.

2.1.3 Обмотки якорів машин постійного струму

Вивчені нами питання принципу дії і будови колекторних машин постійного струму дають можливість встановити, що для роботи машини необхідна наявність у ній двох обмоток: обмотки збудження й обмотки якоря. Перша служить для створення, тобто для збудження в машині магнітного поля, а за допомогою другої відбувається перетворення енергії. Виняток складають магнітоелектричні машини постійного струму, у яких є лише одна (якірна) обмотка, тому що магнітне поле (збудження) у цих машинах створюється постійними магнітами.

Обмотка якоря машини постійного струму являє собою замкнуту систему провідників, певним чином покладених на осердя якоря і приєднаних до колектора.

Елементом обмотки якоря є секція, що містить один чи кілька витків і приєднується до двох колекторних пластин. Секція складається з активних сторін, закладених у пази осердя якоря, і лобових частин, що з'єднують ці сторони. При обертанні якоря в кожній з активних сторін індукуються ЕРС. В лобових же частинах секції ЕРС не індукуються.

Частина поверхні якоря, що приходиться на

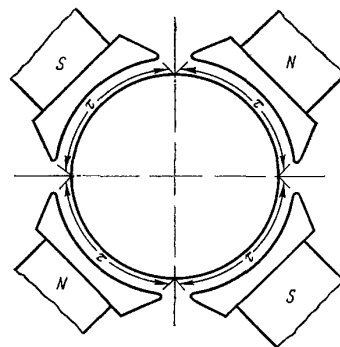


Рис.2.1.12

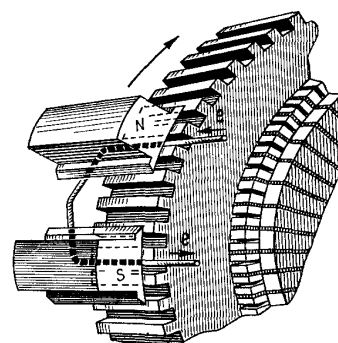


Рис.2.1.13

один полюс, називається *полюсним розподілом* (рис. 2.1.12) і виражається формулою

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

де τ — полюсний розподіл; D — діаметр якоря; $2p$ — число головних полюсів у машині.

Щоб ЕРС, що індукуються в активних сторонах секцій, склалися, тобто діяли узгоджено, секції варто розташувати в пазах осердя якоря так, щоб ширина секції була рівною чи незначно відрізнялася від полюсного розподілу (рис. 2.1.13).

Секції укладаються в пазах осердя якоря в два шари. При цьому якщо одна з активних сторін секції знаходиться в нижній частині одного паза, то її інша сторона знаходиться у верхній частині іншого паза. Верхня сторона однієї секції і нижня сторона іншої, покладені в один паз, утворюють *елементарний паз* (Z_e). В реальному пазу може бути і більш двох активних сторін, наприклад чотири, шість, вісім тощо.

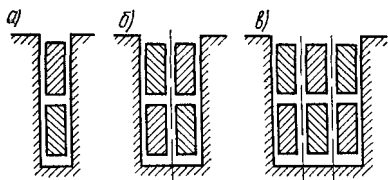


Рис.2.1.14

У цьому випадку реальний паз складається з декількох елементарних пазів (рис. 2.1.14).

Оскільки секція має дві активні сторони, то кожній секції відповідає один елементарний паз. Кінці секції приєднуються до колекторних пластин, при цьому до кожної пластини приєднується початок однієї секції і кінець іншої, тобто на кожен секцію приходить одна колекторна пластина. Таким чином, для якірної обмотки можна записати таку рівність:

$$S = Z_e = K,$$

де S — число секцій в обмотці якоря; Z_e — число елементарних пазів; K — число колекторних пластин.

Для більш зручного і наочного зображення схем якірних обмоток циліндричну поверхню якоря разом з обмоткою умовно розгортають на площині і всі з'єднання провідників зображують прямими лініями на площині креслення (рис. 2.1.15). Виконана в такому виді схема обмотки називається розгорнутою.

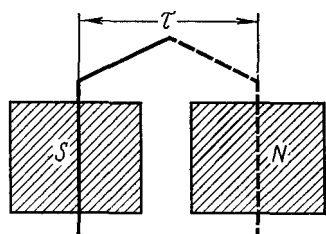


Рис.2.1.15

Залежно від форми секцій і від способу приєднання їх до колектора розрізняють такі типи якірних обмоток: проста петльова, складна петльова, проста хвильова, складна хвильова і комбінована.

2.1.4 Електрорушійна сила обмотки якоря

Величина ЕРС, що індукується в провіднику обмотки якоря, визначається формулою

$$e = Blv.$$

Магнітна індукція B в повітряному зазорі між полюсними наконечниками і поверхнею якоря в різних точках по колу якоря має неоднакові значення. Звичайно в машинах постійного струму її розподіл по поверхні якоря визначається кривою $ABCD$, форма якої близька до трапецеїдальної (рис. 2.1.16, *a*). Площа, обмежена цією кривою і віссю абсцис, пропорційна магнітному потоку в повітряному зазорі під одним полюсом. Оскільки значення індукції B у межах полюсного розподілу τ різні, то для визначення ЕРС зручно скористатися середнім значенням магнітної індукції, прийнявши його рівним висоті прямокутника $AB'C'D$ з основою τ , площа якого дорівнює площі фігури $ABCD$. Тоді середнє значення ЕРС, що індукується в одному провіднику, покладеному на поверхні якоря, дорівнює

$$E_{cp} = B_{cp}lv.$$

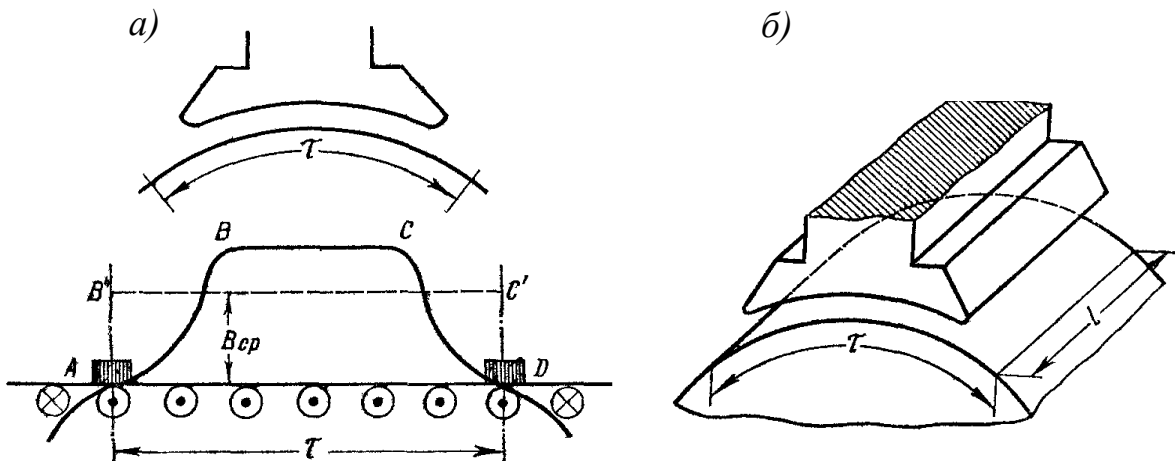


Рис. 2.1.16

Обмотка якоря складається з N провідників, однак ЕРС обмотки визначається величиною ЕРС лише однієї паралельної вітки, що містить $\frac{N}{2a}$ послідовно з'єднаних провідників.

Тому ЕРС обмотки якоря

$$E_a = E_{cp} \frac{N}{2a} = B_{cp}lv \frac{N}{2a},$$

де v — колова швидкість обертового якоря, м/сек

$$v = \frac{\pi Dn}{60},$$

де l — довжина якоря, м; n — швидкість обертання якоря, об/хв;
 D — діаметр якоря, м.

Довжину кола якоря πD можна виразити таким чином:

$$\pi D = \tau 2p,$$

тоді
$$v = \frac{\tau 2pn}{60}.$$

Підставивши цей вираз у формулу, одержимо:

$$E_a = B_{cp} l \frac{\tau 2pn}{60} \frac{N}{2a}.$$

Добуток $l\tau$ є площа, що пронизує магнітний потік одного полюса (див. рис. 2.1.16, б), тому

$$B_{cp} l\tau = \Phi,$$

де Φ — магнітний потік в повітряному зазорі під одним полюсом.

Отже, ЕРС обмотки якоря

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n.$$

Величина $\frac{pN}{60a}$ для даної машини є постійною

$$C_e = \frac{pN}{60a}.$$

Остаточно:

$$E_a = C_e \Phi n.$$

Тут ЕРС E_a виражена в вольтах, а магнітний потік Φ у веберах.

2.1.5 Магнітна система машин постійного струму

Намагнічувальна (магніторухійна) сила (НС) обмотки збудження машини постійного струму створює магнітний потік, що замикається через ділянки машини, які утворюють її *магнітний ланцюг*. Ділянками магнітного ланцюга є: станина, осердя полюсів (включаючи полюсні наконечники), осердя якоря і повітряний зазор між полюсними наконечниками і якорем.

На рис. 2.1.17 зображені магнітні системи машин постійного струму з різним числом головних полюсів. В усіх випадках магнітна система являє собою розгалужений симетричний ланцюг. Магнітний потік кожного

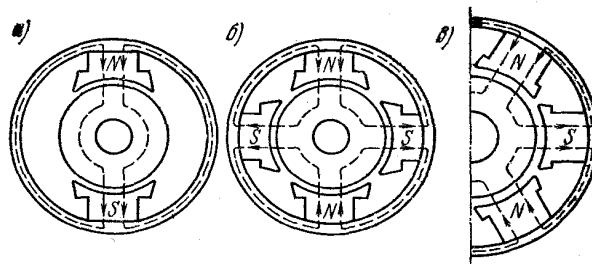


Рис. 2.1.17

полюса розділяється на дві рівні частини і направляє до двох сусідніх полюсів. Кожна частина потоку проходить послідовно по ділянках магнітного ланцюга машини, що складає її розрахункову частину. На рис. 2.1.18 показана розрахункова частина магнітного ланцюга чотириполюсної машини, на якій видні всі її ділянки, а саме: повітряний зазор δ , зубцевий шар h_z , осердя якоря L_a , осердя полюсів h_n і станина L_s .

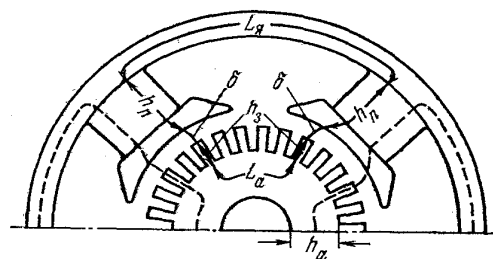


Рис. 2.1.18

Величина магнітного потоку прямо пропорційна НС F і обернено пропорційна сумі магнітних опорів усіх ділянок магнітного ланцюга

$$\Phi = \frac{F}{\sum r_m}$$

Величина основного (корисного) магнітного потоку в зазорі, що потрібна для наведення в обмотці якоря необхідної ЕРС, визначається виразом

$$\Phi = \frac{60a E_a}{pN n}$$

Величина НС, що потрібна для створення в магнітному ланцюзі необхідного магнітного потоку, визначається розрахунком магнітного ланцюга. Оскільки розрахункова частина магнітного ланцюга машини складається з п'яти ділянок, які відрізняються як розмірами, так і властивостями матеріалів, з яких вони виготовлені, то для кожної ділянки магнітного ланцюга розраховують величину *магнітної напруги*: F_δ — повітряного зазору; F_z — зубцевого шару; F_a — осердя якоря; F_n — осердя пари полюсів; F_s — ярма (станини).

Склавши магнітні напруги всіх ділянок магнітного ланцюга, одержують величину НС обмотки збудження:

$$F_o = F_\delta + F_z + F_a + F_n + F_s$$

Слід зазначити, що розрахунок магнітного ланцюга машини ведеться для режиму холостого ходу, тобто для роботи машини без навантаження. Тому НС F_o створює магнітний потік Φ , що забезпечує наведення в обмотці якоря заданої ЕРС E_a лише в режимі холостого ходу.

Магнітна напруга повітряного зазору визначається за формулою

$$F_\delta = 2 \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta K_\delta$$

де B_δ — максимальна магнітна індукція в зазорі машини, Тл; δ — величина зазору, м; K_δ — коефіцієнт зазору, що враховує збільшення магнітного

опору зазору внаслідок зубцевості поверхні якоря ($K_{\delta} > 1$); μ_0 — магнітна проникність повітря:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Магнітна напруга інших ділянок магнітного ланцюга, виконаних зі сталі, визначається за формулою

$$F_x = H_x l_x.$$

де H_x — напруженість магнітного поля; l_x — довжина ділянки магнітного ланцюга.

Відповідно до рис. 2.1.18

$$F_0 = 2 \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta K_{\delta} + 2H_z h_z + H_a L_a + 2H_n h_n + H_y L_y.$$

Значення НС на різних ділянках магнітного ланцюга різні і залежать від магнітного опору цих ділянок.

Найбільший магнітний опір має зазор. Тому значна частина результуючої НС F_0 витрачається на подолання магнітного опору зазору. Що стосується магнітного опору інших ділянок магнітного ланцюга, виконаних зі сталі, той їхній магнітний опір залежить від ступеня магнітного насичення сталі. В умовах найбільшого магнітного насичення знаходиться зубцевий шар, тому його магнітний опір більший, ніж інших ділянок магнітного ланцюга, виконаних зі сталі.

У табл. 2.1 як приклад приведені результати розрахунку магнітного ланцюга генератора постійного струму потужністю 500 кВт, напругою 460 В. Магнітний ланцюг цього генератора містить $2p=8$ полюсів.

Таблиця 2.1

Результати розрахунку магнітного ланцюга генератора

Назва ділянок магнітного ланцюга	0,5 Φ_0	0,75 Φ_0	Φ_0	1,1 Φ_0
	Значення НС, А			
Повітряний зазор, F_{δ}	4750	7120	9500	10450
Зубцевий шар, F_z	43	635	3350	7850
Осердя якоря; F_a	73	140	395	625
Осердя полюсів; F_n	115	265	510	1050
Станина (ярмо), F_y	234	360	610	750
НС на пару полюсів F_0	5065	8520	14365	20825

Розрахунок магнітного ланцюга виконаний для чотирьох значень корисного магнітного потоку Φ , що дорівнюють 0,5 Φ_0 ; 0,75 Φ_0 ; Φ_0 і 1,1 Φ_0 .

Тут Φ_0 — магнітний потік, що відповідає номінальному значенню ЕРС генератора в режимі холостого ходу.

НС обмотки збудження на парі полюсів F_0 визначає кількість витків у полюсній котушці обмотки збудження

$$w_3 = \frac{F_0}{2i_3},$$

де i_3 — величина струму в обмотці збудження.

Величина струму в обмотці збудження, включеній паралельно обмотці якоря, у машинах потужністю від 10 до 1000 кВт приймається рівною відповідно від 3,5 до 1% від номінального струму машини, а в машинах потужністю від 1 до 10 кВт струм збудження приймається рівним від 7 до 3,5%.

У послідовній обмотці збудження струм дорівнює струму в обмотці якоря.

Як відомо, феромагнітні матеріали мають властивість магнітного насичення. Тому залежність між магнітним потоком машини і НС нелінійна, тобто потік збільшується не пропорційно росту НС обмотки збудження. Це підтверджується графічно вираженою залежністю $\Phi=f(F)$, побудованою за даними табл. 2.1 і названою *характеристикою намагнічування* машини (рис. 2.1.19). У початковій частині характеристика

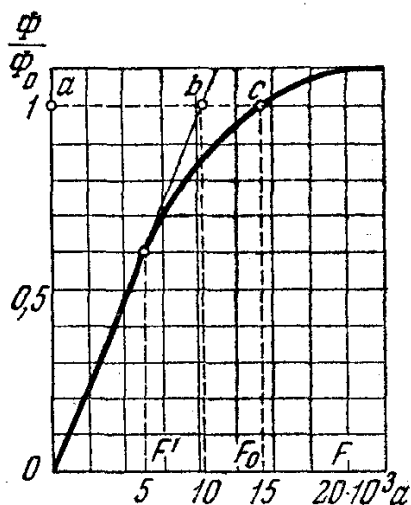


Рис. 2.1.9

прямолінійна. Пояснюється це тим, що при порівняно невеликих значеннях магнітного потоку, коли магнітний ланцюг не насичений, НС збудження визначається лише величиною НС зазору $F\delta$, оскільки магнітний опір сталевих елементів магнітного ланцюга дуже незначний. НС $F\delta$ пропорційна магнітній індукції $B\delta$, а отже, пропорційна магнітному потоку. Тому дотична до кривої намагнічування через початок координат являє собою залежність магнітної напруги зазору $F\delta$ від корисного магнітного потоку Φ .

При збільшенні НС збудження до значень, що перевищують F' , настає магнітне насичення сталевих елементів ланцюга і залежність $\Phi=f(F)$ стає нелінійною. Раніше ніж на інших ділянках відбувається насичення зубцевого шару якоря. Тому НС F_3 на цій ділянці зі збільшенням магнітного потоку росте інтенсивніше, ніж на інших ділянках магнітного ланцюга.

Якщо дотичну до початкової частини характеристики намагнічування продовжити до горизонтальної прямої, проведеної через точку $\frac{\Phi}{\Phi_0}=1$ на осі

ординат, то відрізок ac вкаже на величину НС збудження F_0 , а відрізок ab — на величину НС зазору $F\delta$. Відношення цих НС називається *коефіцієнтом насичення*

$$K_{\mu} = \frac{F_0}{F_{\delta}} = \frac{ac}{ab}.$$

По величині K_{μ} можна судити про ступінь насичення магнітного ланцюга машини. Звичайно машина працює при насиченій магнітній системі, тобто при $K_{\mu} > 1$. Для машин нормального виконання

$$K_{\mu} = 1,25—1,75.$$

При незмінній швидкості обертання ЕРС машини постійного струму E_a пропорційна магнітному потоку Φ , а НС збудження пропорційна струму збудження i_3

$$F_0 = 2i_3 w_3.$$

Тому характеристика намагнічування $\Phi=f(F)$ є також вираженням залежності ЕРС машини від струму збудження $E_a=f(i_3)$ і називається *характеристикою холостого ходу машини*.

2.1.6 Реакція якоря

При роботі машини постійного струму в режимі холостого ходу струм в обмотці якоря практично відсутній і в магнітному ланцюзі машини діє лише одна НС обмотки збудження F_0 . Магнітне поле машини в цьому випадку є симетричним щодо осі полюсів (рис. 2.1.10, а), а графік розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі являє собою криву, близьку до трапецеїдальної (рис. 2.1.10, б).

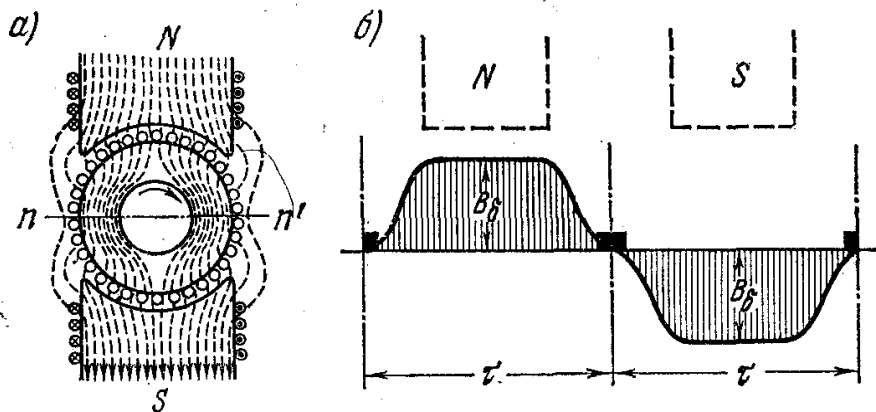


Рис. 2.1.10

Якщо ж машину навантажити, то в обмотці якоря з'явиться струм, що створить НС якоря, F_a .

Припустимо, що НС збудження дорівнює нулю й у машині діє лише НС якоря. Тоді магнітне поле, що створене цією НС, буде мати вигляд, представлений на рис. 2.1.11, а. З цього рисунка видно, що НС обмотки якоря спрямована по лінії щіток (у даному випадку по геометричній нейтралі).

Варто звернути увагу, що хоч якір обертається, але просторовий напрямок НС обмотки якоря залишається незмінним, оскільки залежить винятково від положення щіток.

Найбільше значення НС обмотки якоря має на лінії щіток крива 1, (рис. 2.1.11, б), а по осі полюсів ця НС дорівнює нулю. Однак розподіл магнітної індукції в зазорі від магнітного потоку якоря збігається з розподілом НС

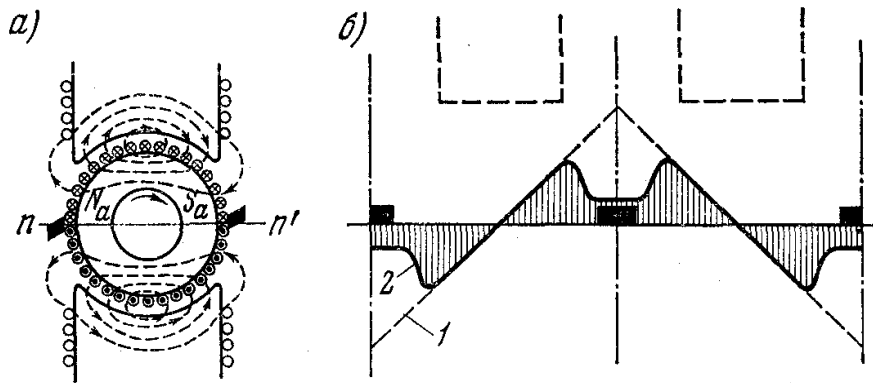


Рис. 2.1.11

лише в межах полюсних наконечників.

У міжполюсному просторі магнітна індукція різко зменшується (крива 2 на рис. 2.1.11, б). Пояснюється це збільшенням магнітного опору потоку якоря в міжполюсному просторі. Величина НС обмотки якоря F_a визначається числом провідників в обмотці якоря на полюсному розподілі τ і величиною струму i_a у цих провідниках

$$F_a = \frac{N}{\pi D} i_a \tau,$$

де $\frac{N}{\pi D}$ — число провідників обмотки на одиницю довжини кола якоря;

$i_a = \frac{I_a}{2a}$ — струм у провідниках обмотки якоря, що дорівнює струму паралельної вітки.

Позначивши $\frac{N}{\pi D} i_a = A$, одержимо такий вираз НС якоря:

$$F_a = A \tau.$$

Тут A — лінійне навантаження якоря, що являє собою частину НС якоря, що приходить на 1 см довжини окружності якоря. Значення лінійного навантаження може бути від 65 до 700 А/см, залежно від потужності машини.

Таким чином, у навантаженій машині постійного струму діють дві НС: НС збудження F_o і НС обмотки якоря F_a .

Вплив НС обмотки якоря на магнітне поле машини називається реакцією якоря. Реакція якоря спотворює основне магнітне поле, роблячи його несиметричним щодо осі полюсів машини.

На рис. 2.1.12, *a* показаний розподіл ліній результуючого поля машини, що працює в режимі генератора при обертанні якоря по годинниковій стрілці. Такий розподіл ліній магнітного поля відповідає також і двигуну, але при обертанні якоря проти годинникової стрілки.

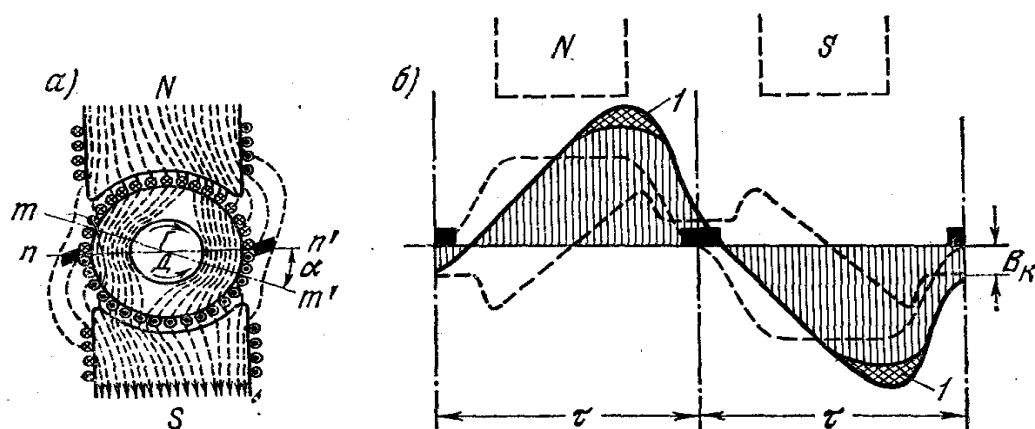


Рис. 2.1.12

Якщо припустити, що магнітна система машини не насичена, то реакція якоря лише спотворює результуючий магнітний потік, не змінюючи його величини. Край полюса і зубцевий шар осердя якоря, що знаходиться під ним, де напрямок НС якоря збігається з напрямком НС основних полюсів, підмагнічуються; інший край полюса і зубцевий шар, де НС якоря спрямована зустрічно НС основних полюсів, розмагнічуються. При цьому результуючий магнітний потік наче повертається щодо осі основних полюсів на деякий кут, а фізична нейтраль mm' (лінія, що проходить через точки на якорі, у яких індукція дорівнює нулю) зміщується щодо геометричної нейтралі nn' на кут α (рис. 2.1.12, *a*). Чим більше навантаження машини, тим сильніше перекачування результуючого поля, а отже, тим більший кут зсуву фізичної нейтралі. При роботі машини в режимі генератора фізична нейтраль зміщується по напрямку обертання якоря, а при роботі двигуном — проти обертання якоря.

Перекачування результуючого поля машини несприятливо позначається на її робочих властивостях.

По-перше, зрушення фізичної нейтралі щодо геометричної приводить до більш тяжких умов роботи щіткового контакту і може служити причиною утворення іскор на колекторі.

По-друге, перекачування результуючого поля машини спричиняє перерозподіл магнітної індукції в повітряному зазорі. На рис. 2.1.12, *b* показаний графік розподілу магнітної індукції результуючого поля в повітряному зазорі, отриманий сполученням кривих (див. рис. 2.1.10, *b* і рис. 2.1.11, *b*).

З цього графіка випливає, що магнітна індукція в повітряному зазорі машини розподіляється несиметрично, різко збільшуючись під підмагніченими краями полюсів. У результаті миттєві значення ЕРС секцій обмотки якоря в моменти влучення їхніх активних сторін у зони

максимальних значень індукції (під підмагніченим краєм полюсних наконечників) підвищуються. Це приводить до росту напруги між суміжними колекторними пластинами U_k . При значних перевантаженнях машини напруга U_k перевершить припустимі значення і міканітова прокладка може бути перекрита електричною дугою. Наявність на колекторі частки графіту і металевий пил сприяють розвитку електричної дуги, у результаті чого робота електричної машини може бути порушена. Такі наслідки реакції якоря в машині з ненасиченою магнітною системою.

Якщо ж магнітна система машини насичена, що має місце в більшості електричних машин, то підмагнічування одного краю полюсного наконечника і зубцевого шару осердя якоря, що знаходиться під ним, відбувається в меншому ступені, чим розмагнічування іншого краю і зубцевого шару якоря, що знаходиться під ним.

Розподіл індукції в зазорі стає більш рівномірним, однак величина результуючого потоку при цьому зменшується. Іншими словами, *реакція якоря в машині з насиченою магнітною системою розмагнічує машину*. У результаті погіршуються робочі властивості машини: у генераторах знижується ЕРС, у двигунах зменшується обертаючий момент.

Вплив розмагнічувальної дії реакції якоря підсилюється при зсуві щіток з геометричної нейтралі. Пояснюється це тим, що разом із щітками зміщається і вектор НС якоря (рис. 2.1.13).

При цьому НС якоря, F_a , крім поперечної складової $F_{aq}=F_a \cos \beta$, здобуває ще і подовжню складову $F_{ad}=F_a \sin \beta$, спрямовану по осі полюсів. Якщо машина працює в режимі генератора, то при зсуві щіток у напрямку обертання якоря подовжня складова НС якоря F_{ad} діє зустрічно НС збудження F_o , що веде до ослаблення основного магнітного потоку машини; при зсуві щіток проти обертання якоря подовжня складова F_{ad} діє узгоджено з F_o , що веде до деякого збільшення основного магнітного потоку машини.

Якщо ж машина працює в режимі двигуна, то при зсуві щіток по напрямку обертання якоря подовжня складова НС якоря F_{ad} діє узгоджено з НС F_o , а при зсуві щіток проти обертання якоря F_{ad} діє зустрічно з НС F_o і розмагнічує машину.

Разом з тим варто вказати, що зсув щіток з геометричної нейтралі супроводжується послабленням спотворюючого впливу реакції якоря. Справа в тому, що при положенні щіток на геометричній нейтралі всі НС якоря F_a є поперечними ($F_{aq}=F_a$) а при зсуві щіток на кут β щодо геометричної нейтралі поперечна складова НС якоря зменшується ($F_{aq}=F_a \cos \beta$).

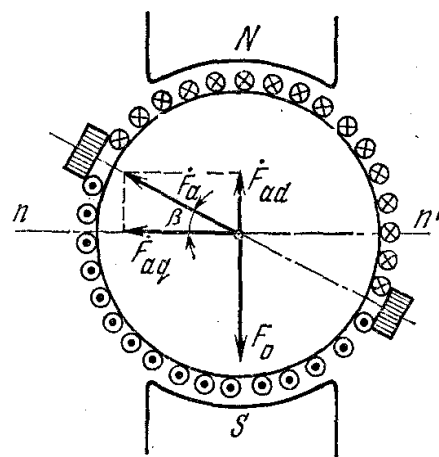


Рис. 2.1.13.

Вплив реакції якоря на роботу щіткового контакту усувається застосуванням у машинах *додаткових полюсів*, що будучи встановленими між головними полюсами створюють НС, що усуває вплив поперечної складової НС якоря на геометричній нейтралі (у зоні комутації).

Найбільш діючим засобом усунення нерівномірного розподілу індукції в повітряному зазорі є застосування в машинах постійного струму *компенсаційної обмотки*.

Компенсаційна обмотка укладається в пази полюсних наконечників і включається послідовно з обмоткою якоря таким чином, щоб її НС F_k була протилежна по напрямку НС обмотки якоря F_a . Компенсаційна обмотка виконується розподіленою по всій поверхні полюсного наконечника всіх головних полюсів.

Включення компенсаційної обмотки послідовно з обмоткою якоря забезпечує автоматичність компенсації НС якоря при будь-якому навантаженні машини.

Машина постійного струму з компенсаційною обмоткою більш надійна в роботі. При наявності компенсаційної обмотки магнітне поле машини при переході з режиму холостого ходу до навантаження залишається практично незмінним, однак компенсаційна обмотка здорожує машину й ускладнює її конструкцію. Тому компенсаційні обмотки застосовують тільки в машинах великої потужності (починаючи з 150 кВт), що працюють з різкими коливаннями навантаження, наприклад в електродвигунах прокатних станів.

Вплив розмагнічувальної дії реакції якоря на машину компенсується збільшенням НС обмотки збудження. Досвід показує, що для компенсації впливу реакції якоря необхідно збільшити НС збудження у режимі холостого ходу F_0 на 15—30%. Це досягається збільшенням числа витків у полюсних котушках.

2.2 ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Як було встановлено, для роботи електричної машини необхідна наявність у ній магнітного потоку, що збуджує машину. Залежно від способу створення цього магнітного потоку електричні машини розділяються на машини з *електромагнітним збудженням* і машини зі *збудженням постійними магнітами* (магнітоелектричні). У машинах з електромагнітним збудженням магнітний потік створюється за допомогою обмотки збудження, що може включатися по різних схемах

Залежно від схеми включення обмотки збудження генератори постійного струму (ГПС) з електромагнітним збудженням розділяються на генератори незалежного збудження, у яких обмотка збудження отримує живлення від стороннього джерела енергії постійного струму (див. рис. 2.2.1, *a*), і генератори із самозбудженням, у яких живлення обмотки збудження здійснюється від самого генератора.

Генератори із *самозбудженням* у свою чергу, підрозділяються на такі види:

а) генератори паралельного збудження (шунтові), у яких обмотка збудження приєднана до затисків обмотки якоря паралельно навантаженню (рис. 2.2.1, б);

б) генератори послідовного збудження (серієсні), у яких обмотка збудження приєднана послідовно до обмотки якоря (рис. 2.2.1, в);

в) генератори змішаного збудження (компаундні), що мають, дві обмотки збудження: одну — включену паралельно, а іншу — послідовно (рис. 2.2.1, г).

Генератори зі збудженням постійними магнітами не мають обмотки збудження (рис. 2.2.1, д), тому що їхні головні полюси виготовляються у вигляді постійних магнітів.

У процесі роботи генератора постійного струму в його якірній обмотці індукуються ЕРС. При підключенні до генератора навантаження в ланцюзі якоря виникає струм, а на виводах генератора встановлюється напруга

$$U = E_a - I_a \sum r.$$

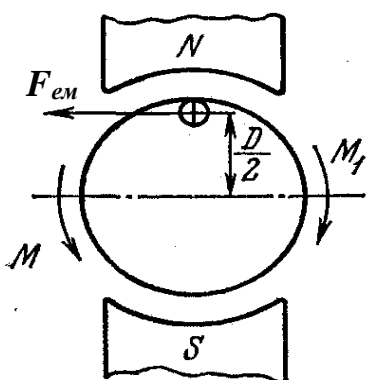
Тут $\sum r$ являє собою суму опорів усіх ділянок ланцюга якоря. У загальному вигляді цей опір

$$\sum r = r_a + r_o + r_k + r_c + r_{щ},$$

тобто він складається з опорів: обмотки якоря r_a , обмотки додаткових полюсів r_o , компенсаційної обмотки r_k , r_c — послідовної обмотки збудження і $r_{щ}$ — перехідного щіткового контакту.

Якір генератора приводиться в рух первинним двигуном, що створює на валу генератора обертаючий момент M_1 . Якщо генератор працює в режимі холостого ходу ($I_a = 0$), то для обертання його якоря потрібний порівняно невеликий момент, що називається *моментом холостого ходу* M_0 . Цей момент витрачається на подолання тертя в підшипниках, тертя щіток об колектор, тертя обертових частин об повітря.

При роботі навантаженого генератора в проводах обмотки якоря з'являється струм $i_a = \frac{I_a}{2a}$. У результаті взаємодії цього струму з основним магнітним полем машини на кожен провідник обмотки якоря діє електромагнітна сила (рис.2.2.2)



$$F_{ем} = B_{cp} l i_a,$$

де B_{cp} — середнє значення магнітної індукції в зазорі; l — довжина якоря.

Визначивши за правилом «лівої руки» напрямок цих сил, переконуємося, що створюваний ними електромагнітний момент M спрямований проти обертаючого моменту первинного двигуна M_1 .

Рис. 2.2.2

Величину електромагнітного моменту M можна представити виразом

$$M = F_{em} \frac{D}{2} N = B_{cp} l i_a \frac{D}{2} N,$$

де N — кількість активних провідників в обмотці якоря.

Маючи на увазі, що $i_a = \frac{I_a}{2a}$, $\pi D = 2p\tau$, а корисний магнітний потік збудження $\Phi = B_{cp} l \tau$, одержимо

$$M = B_{cp} l \frac{I_a}{2a} \frac{2p\tau}{2\pi} N = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a, \text{ або}$$

$$M = C_m \Phi I_a,$$

де C_m — величина, постійна для даної машини.

Потік Φ виражається у веберах (Вб), а момент M — у ньютонно-метрах (Н·м).

Таким чином, при незмінній швидкості обертання ($n_a = \text{const}$) обертаючий момент первинного двигуна M_1 врівноважується сумою протидіючих моментів: моментом холостого ходу M_0 й електромагнітним моментом M

$$M_1 = M_0 + M.$$

Отриманий вираз являє собою *рівняння моментів для генератора при $n = \text{const}$* .

Режим роботи електричної машини, для якого машина призначена і при якому вона повинна нормально працювати протягом усього терміну служби, називається *номінальним режимом роботи*. Цей режим характеризується номінальними величинами: номінальна потужність P_n ; номінальна напруга U_n , номінальний струм I_n і номінальна швидкість обертання n_n . *Номінальна потужність* генератора постійного струму являє собою корисну електричну потужність на затисках машини, виражену у ватах, кіловатах чи мегаватах.

Крім зазначених величин, номінальними називаються й інші величини, якщо вони відповідають номінальному режиму роботи машини.

Експлуатаційні властивості генераторів визначаються графічно вираженими залежностями, які називаються *характеристиками*.

Оскільки генератори звичайно працюють при незмінній швидкості обертання, то всі характеристики будуються за умови $n = \text{const}$. Основними характеристиками генераторів є:

1. *Характеристика холостого ходу* — залежність напруги на виході генератора в режимі холостого ходу U_0 від струму збудження i_3 .

$$U_0 = f(i_3) \text{ при } I = 0 \text{ і } n = \text{const}.$$

2. *Навантажувальна характеристика* — залежність напруги на виході генератора U при роботі з навантаженням ($I \neq 0$) від струму збудження i_3 .

$$U=f(i_3) \text{ при } I \neq 0 \text{ і } n=\text{const.}$$

3. *Зовнішня характеристика* — залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження I

$$U=f(I) \text{ при } r_{\text{пр}}=\text{const і } n=\text{const.}$$

4. *Регульовальна характеристика* — залежність струму збудження i_3 від струму навантаження I при незмінній напрузі на виході генератора

$$i_3=f(I) \text{ при } U=\text{const і } n=\text{const.}$$

2.3 ЕЛЕКТРИЧНІ ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Електричні машини мають властивість зворотності, тобто вони можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Тому якщо машину постійного струму підключити до джерела енергії постійного струму, то в обмотці збудження й в обмотці якоря машини з'являться струми. Взаємодія струму якоря з полем збудження створює на валу якоря електромагнітний момент M . Однак тепер цей момент є не гальмуючим, як це мало місце в генераторі, а *обертаючим* моментом (рис. 2.3.1). Під дією електромагнітного моменту якор машини почне обертатися, тобто машина буде працювати в режимі електродвигуна, споживаючи з мережі електричну енергію і перетворюючи її в механічну.

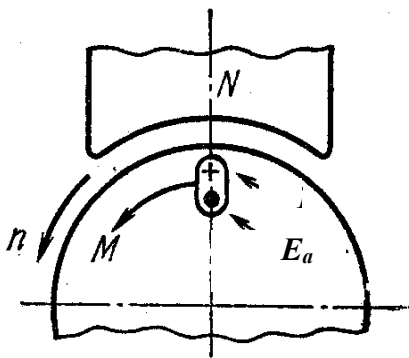


Рис. 2.3.1

В обмотці якоря індукується ЕРС E_a , напрямок якої можна визначити за правилом «правої руки». По своїй природі ця ЕРС нічим не відрізняється від ЕРС, що наводиться в якірній обмотці генератора. У двигуні ж вона спрямована проти струму I_a і тому називається *протиелектрорушійною силою (проти-ЕРС) якоря* (рис. 2.3.1).

Для двигуна, що працює з постійною швидкістю обертання, можна скласти рівняння ЕРС

$$U = E_a + I_a \sum r.$$

З цього рівняння випливає, що підведена до двигуна напруга врівноважується проти-ЕРС якірної обмотки і спаданням напруги в ланцюзі якоря. Тоді визначення струму якоря

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r}.$$

Помноживши обидві частини рівняння на струм якоря I_a , одержимо рівняння потужності

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 \sum r.$$

Тут UI_a — потужність у ланцюзі обмотки якоря; $I_a^2 \Sigma r$ — потужність електричних втрат у ланцюзі якоря.

Що ж стосується виразу $E_a I_a$, то для з'ясування його сутності проведемо таке перетворення:

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega.$$

Але $\frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = M$, тоді

$$E_a I_a = M \omega = P_{em},$$

де $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ кутова швидкість обертання якоря; P_{em} — електромагнітна потужність двигуна.

Отже, вираз $E_a I_a$ являє собою *електромагнітну потужність* двигуна, чисельно рівну тій частині потужності на вході двигуна, що у процесі його роботи перетвориться в механічну потужність, необхідну для обертання якоря.

Потужність у ланцюзі обмотки якоря

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \Sigma r.$$

Аналіз цього рівняння показує, що зі збільшенням навантаження на вал двигуна, тобто зі збільшенням електромагнітного моменту M , зростає потужність у ланцюзі обмотки якоря UI_a , тобто потужність на вході двигуна. Але оскільки напруга, що підведена до двигуна, підтримується незмінною ($U = \text{const}$), то збільшення навантаження двигуна супроводжується ростом струму в обмотці якоря I_a .

Залежно від способу збудження двигуни постійного струму (ДПС), так само як і генератори, поділяються на двигуни зі збудженням від постійних магнітів (магнітоелектричні) і з електромагнітним збудженням. Останні, відповідно до схеми включення обмотки збудження щодо обмотки якоря, підрозділяються на двигуни паралельного (шунтові), послідовного (серієсні) і змішаного (компаундні) збудження. Принципові схеми цих двигунів не відрізняються від схем генераторів.

Електромагнітний момент M приводить якір двигуна в обертання, що через вал передається виконавчому механізму. При цьому на вал двигуна діють наступні моменти:

- 1) *обертаючий (електромагнітний) момент M* ;
- 2) *момент холостого ходу M_0* , обумовлений механічними (включаючи вентиляційні) і магнітними втратами в двигуні. Величина моменту M_0 не залежить від навантаження й у двигунах нормального виконання вона не перевищує 2—6% від номінального значення обертаючого моменту (M_n);
- 3) *корисний момент M_2* , тобто протидіючий момент механізму, що приводиться в дію даним двигуном. Наприклад, якщо двигун обертає

барабан діаметром D , на який намотується трос з вантажем F , то корисний момент

$$M_2 = F \frac{D}{2} [\text{н} \cdot \text{м}];$$

4) *динамічний момент* M_δ , виникаючий при всякій зміні швидкості двигуна в зв'язку з інерцією обертових частин двигуна і приведеного ним у дію механізму

$$M_{\ddot{a}} = J \frac{d\omega}{dt},$$

де J — момент інерції всіх обертових частин агрегату, приведений до вала двигуна і віднесений до кутової швидкості обертання ω .

Звичайно моменти M_0 і M_2 розглядають спільно як суму

$$M_0 + M_2 = M_{\ddot{\omega}},$$

де M_{cm} — *статичний момент* опору обертанню вала двигуна.

У загальному випадку рівняння моментів двигуна

$$M = M_0 + M_2 \pm M_\delta,$$

або

$$M = M_{cm} \pm M_\delta.$$

Знак «плюс» чи «мінус» у динамічного моменту визначається характером зміни швидкості: при збільшенні швидкості M_δ складається з моментом M_{cm} (знак «плюс»), а при зменшенні швидкості M_δ діє проти моменту M_{cm} (знак «мінус»).

При незмінній швидкості обертання якоря динамічний момент $M_\delta = 0$, тоді рівняння моментів двигуна

$$M = M_0 + M_2 = M_{cm},$$

тобто *при сталому режимі роботи обертаючий момент двигуна і статичний момент опору на його валу взаємно врівноважуються*.

Крім того, обертаючий момент двигуна пропорційний електромагнітній потужності, а тому

$$M = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{P_{em}}{2\pi n} = \frac{60}{2\pi} \frac{P_{em}}{n} = 9,55 \frac{P_{em}}{n}.$$

Величина корисного моменту двигуна M_2 пропорційна корисній потужності двигуна, що дає можливість одержати рівняння корисного моменту

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n},$$

де P_2 - корисна потужність двигуна (потужність на валу), Вт; M_2 — корисний момент, н м; n — швидкість обертання, об /хв.

Швидкість обертання двигуна

Відповідно до формули ЕРС $E_a = C_e \Phi n$, швидкість обертання двигуна визначається виразом

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi}.$$

Підставивши значення E_a , одержимо

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{C_e \Phi},$$

тобто, швидкість обертання електродвигуна прямо пропорційна напрузі і обернено пропорційна магнітному потоку збудження. Фізично це пояснюється тим, що збільшення напруги U чи зменшення потоку Φ викликає збільшення різниці $(U - E_a)$, що, у свою чергу, веде до збільшення струму I_a . Унаслідок цього струм, що зріс, підвищує обертаючий момент, і якщо при цьому навантажувальний момент залишається незмінним, то швидкість обертання двигуна збільшується.

Регулювати швидкість обертання двигуна можна або зміною напруги U , або зміною магнітного потоку збудження Φ .

Напрямок обертання якоря визначається напрямком магнітного потоку збудження Φ и напрямком струму в обмотці якоря. Тому, змінивши напрямок якої-небудь із зазначених величин, можна змінити напрямок обертання якоря. Варто мати на увазі, що переключення загальних затисків схеми не дає зміни напрямку обертання якоря, тому що при цьому одночасно змінюється напрямок струму й в обмотці якоря й в обмотці збудження.

При дослідженні роботи двигунів постійного струму велике значення має залежність швидкості обертання двигуна від обертаючого моменту $M = M_0 + M_2$. Ця залежність графічно виражається *механічною характеристикою* $n = f(M)$ двигуна при $U = \text{const}$ і $r_{\text{г}} = \text{const}$.

Перетворивши вираз

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a \sum r}{C_e \Phi}$$

і підставивши сюди значення струму $I_a = M / C_m \Phi$ одержимо

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M \sum r}{C_e C_i \Phi^2}.$$

З цього виразу видно, що на механічні характеристики двигуна істотно впливає спосіб збудження.

Двигун працює стійко й обертається з постійною швидкістю, якщо обертаючий момент, що розвивається, дорівнює протидіючому моменту

$$M = M_{cm}.$$

Однак стійка робота двигуна можлива лише при дотриманні визначених умов. Для ілюстрації розглянемо графіки зміни моментів $M=f(n)$ і $M_{cm}=f(n)$, показані на рис. 2.3.2, а. Точка перетинання кривих відповідає стійкій роботі двигуна ($M=M_{cm}$).

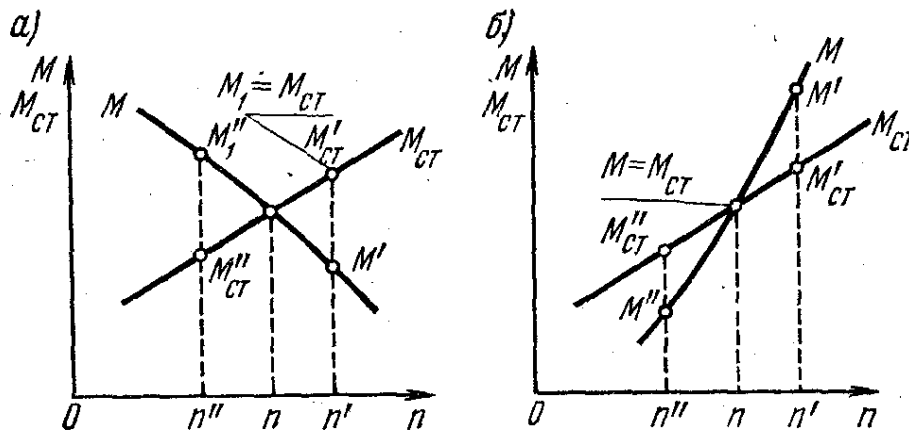


Рис. 2.3.2

При випадковій зміні швидкості обертання, наприклад від n до n' , рівність порушиться і протидіючий момент M'_{cm} стане більше обертаючого моменту M' . Це приведе до зменшення швидкості, до значення n , при якому $M=M_{cm}$.

Аналогічно, при випадковому зниженні швидкості обертання n , наприклад до значення n'' , обертаючий момент M'' стає більше протидіючого моменту M''_{cm} і якор двигуна одержує прискорення, що повертає його до вихідної швидкості обертання. Таким чином, при дії збурюючих факторів робота двигуна залишається стійкою.

Якщо ж характеристики $M=f(n)$ і $M_{cm}=f(n)$ мають вид кривих, показаних на рис. 2.3.2, б, робота електродвигуна стає хитливою. Дійсно, при випадковій зміні швидкості від n до n' надлишковий обертаючий момент M' викликає подальше збільшення швидкості. Якщо ж відбудеться зміна швидкості від n до n'' , то надлишковий протидіючий момент викликає подальше зменшення швидкості. Іншими словами, робота двигуна буде нестійкою.

У загальному випадку умова стійкої роботи двигуна формулюється в такий спосіб: при зростанні швидкості обертання приріст обертаючого моменту повинний бути менше приросту протидіючого моменту

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{\bar{n}0}}{dn}.$$

Звичайно для виконання цієї умови необхідно, щоб збільшення швидкості обертання двигуна супроводжувалося зменшенням обертаючого моменту (рис. 2.3.2, а).

Пуск двигуна в хід

Величина струму якоря двигуна визначається формулою

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r}$$

Якщо прийняти U і $\sum r$ незмінними, то струм I_a залежить від величини проти-ЕРС E_a . Найбільшої величини струм I_a досягає при пуску двигуна в хід. У початковий момент пуску якоря двигуна нерухомий ($n=0$) і в його обмотці не індукується ЕРС ($E_a=0$). Тому при безпосередньому підключенні двигуна до мережі в обмотці якоря виникає пусковий струм

$$I'_a = \frac{U}{\sum r}$$

Звичайно опір $\sum r$ невеликий, тому величина пускового струму досягає неприпустимо великих значень, у 10—15 разів перевищуючих номінальний струм двигуна. Такий великий пусковий струм дуже небезпечний для двигуна. По-перше, він може викликати в машині коловий вогонь, а по-друге, при такому струмі в двигуні розвивається надмірно великий пусковий момент, що робить ударну дію на обертові частини двигуна і може механічно їх зруйнувати.

І, нарешті, цей струм викликає різке спадання напруги в мережі, що несприятливо відбивається на роботі інших споживачів, включених в цю мережу.

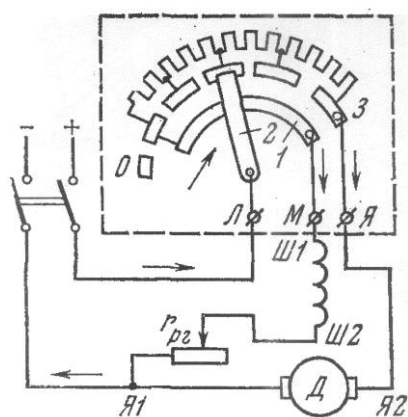


Рис. 2.3.3.

Тому пуск у хід безпосереднім підключенням двигуна в мережу застосовується лише для двигунів малої потужності (до 0,5 кВт). У цих двигунах завдяки підвищеному опору обмотки якоря і невеликим обертовим масам величина пускового струму лише в 3—5 разів перевищує номінальний, що не є небезпечкою для двигуна. Що ж стосується двигунів великої потужності, то при їхньому пуску в хід для обмеження величини пускового струму застосовують пускові реостати ПР, що включаються послідовно в ланцюг якоря (рис. 2.3.3).

У початковий момент пуску опір реостата роблять найбільшим. У цьому випадку величина пускового струму

$$I_n = \frac{U}{\sum r + r_{\text{макс}}}.$$

В міру наростання швидкості якоря проти-ЕРС збільшується, а струм якоря зменшується. Тому опір реостата варто зменшити, щоб наприкінці пуску він був цілком виведеним. В протилежному випадку на нагрів реостата буде затрачатися значна енергія, що надходить в двигун з мережі, і корисна потужність двигуна буде набагато знижена. Крім того, тривалий струм в опорах реостата приведе до їх перегріву і навіть до перегорання.

Опір пускового реостата вибирається звичайно таким, щоб пусковий струм перевищував номінальний не більше ніж в два-три рази.

Оскільки обертаючий момент двигуна M прямо пропорційний магнітному потоку Φ , то при пуску в хід двигунів паралельного і змішаного збудження для полегшення пуску опір реостата в ланцюзі збудження $r_{\text{рп}}$ варто цілком вивести ($r_{\text{рп}}=0$). Потік збудження Φ у цьому випадку одержує найбільше значення, і двигун розвиває необхідний обертаючий момент при меншому струмі якоря.

Для пуску в хід двигунів великої потужності застосовувати пускові реостати недоцільно, тому що це викликало б значні втрати енергії. Крім того, пускові реостати були б у цьому випадку надто громіздкими. Тому в двигунах великої потужності застосовують безреостатний пуск шляхом зниження напруги. Прикладами цього є пуск тягових двигунів електровоза переключенням їх з послідовного з'єднання при пуску на паралельне при нормальній роботі чи пуск двигунів в схемі «генератор—двигун».

Для пуску в хід двигунів постійного струму застосовують металеві реостати з повітряним охолодженням або масляним охолодженням. Реостати бувають дво-, три- і чотиризатисними. Розглянемо конструкцію тризатисного реостата і порядок операції при реостатному пуску двигуна паралельного збудження (див. рис. 2.3.3).

Реостат має шість контактів: холостий (0), чотири проміжних і робочий (3): Мідна дуга 1 з'єднана з затиском М до якого підключена обмотка збудження. Завдяки цій дузі струм збудження не залежить від опору реостата, тому що обмотка збудження виявляється включеною на повну напругу мережі. Важіль 2 електрично з'єднаний з дугою 1. Залежно від положення важеля останній з'єднується з тим чи іншим контактом. Перед пуском важіль повинен знаходитися на холостому контакті (0).

Щоб пустити двигун в хід, включають рубильник і важіль реостата переводять на перший проміжний контакт. При цьому двигун збуджується, а в ланцюзі якоря з'являється пусковий струм I_n , величина якого обмежена всіма чотирма секціями опору r_n . В міру збільшення швидкості обертання якоря пусковий струм зменшується, і важіль реостата переводять на другий, третій контакт і так далі, поки він не виявиться на робочому контакті 3. При цьому опори реостата будуть виведені ($r_n=0$).

З метою полегшення конструкції пускові реостати виготовляють на невелике число ступенів, а опори секцій розраховують на короткочасний

струм. Тому важіль реостата не слід довго затримувати на проміжних контактах, тому що в протилежному випадку опори реостата перегріваються і можуть перегоріти.

При відключенні двигуна від мережі необхідно, щоб ланцюг збудження не розмикався, тому що в цьому випадку запас електромагнітної енергії обмотки збудження викликає ЕРС самоіндукції, що створює електричну

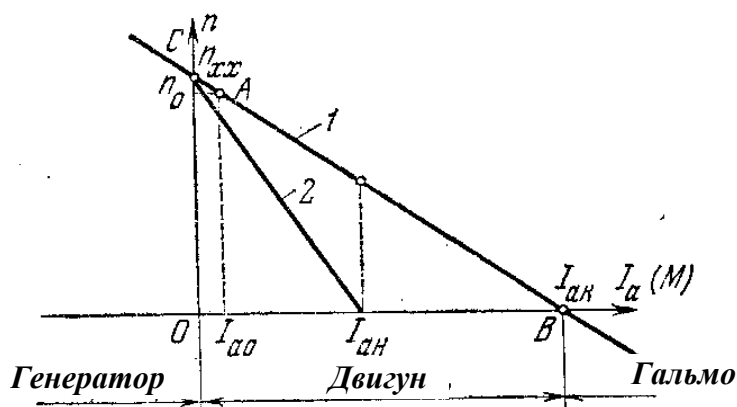


Рис. 2.3.4.

дугу на контактах, які розмикаються, і може викликати пробій ізоляції обмотки збудження.

Щоб уникнути цього, перший робочий контакт магнітного поля пускового реостату електрично з'єднують з дугою I , завдяки чому при перемиканні важеля на холостий контакт O ланцюг збудження опиняється замкнутим на опір реостату і енергія магнітного поля, що накопичена в обмотці збудження, витрачається в опорі r_{Π} на його нагрівання.

Для пуску двигунів послідовного збудження застосовуються двозатисні пускові реостати, що відрізняються від тризатисних відсутністю мідної дуги I і наявністю тільки двох затисків: L і $Я$.

Режими роботи машини постійного струму

У двигунах паралельного збудження при незмінному струмі в обмотці збудження ($i_3 = const$) магнітний потік змінюється при навантаженні дуже незначно. Тому з деяким наближенням можна прийняти $\Phi = const$. У цьому випадку електромагнітний момент пропорційний струму в ланцюзі якоря і механічна характеристика $n = f(M)$ може бути представлена залежністю $n = f(I_a)$ (рис. 2.3.4). Якщо цю характеристику продовжити в обидва боки за межі осей координат, то можна показати, що електрична машина залежно від величини і знаку зовнішнього моменту, що діє на її вал з боку зв'язаного з ним механізму, може працювати в трьох режимах: двигуна, гальма і генераторному.

При роботі двигуна без навантаження струм у ланцюзі якоря I_{a0} невеликий. Тому швидкість обертання $n = n_0$ (точка A). Потім з появою на

валу двигуна навантажувального моменту, що протидіє обертаючому, струм у ланцюзі якоря зростає, а швидкість обертання зменшується.

Якщо збільшити протидіючий момент до значення, при якому якір двигуна зупиниться (точка B), то струм двигуна досягне значення

$$I_{ак} = \frac{U}{\sum r}.$$

Якщо двигун застосовується для приводу механізму, навантажувальний момент якого може бути більше обертаючого (наприклад, привод барабана, на який намотується трос з вантажем), то при наступному збільшенні моменту цього механізму якір машини знову почне обертатися, але тепер вже в інший бік.

Тепер момент, що діє на вал електричної машини з боку навантажувального механізму, буде обертаючим, а електромагнітний момент машини — гальмуючим, тобто електрична машина перейде в *режим гальма*. При роботі машини в цьому режимі ЕРС якоря діє в узгодженні з напругою

$$I_{\dot{a}} = \frac{U + E_a}{\sum r}.$$

При практичному використанні машини в гальмовому режимі необхідно прийняти міри для обмеження струму якоря. З цією метою в ланцюг якоря включають додатковий опір, величина якого забезпечує одержання штучної характеристики двигуна, що перетинається з віссю абсцис при струмі якоря $I_{ак} \leq I_{ан}$

Якщо при роботі двигуна в режимі холостого ходу до його вала прикласти момент, спрямований у бік обертання якоря, то швидкість обертання, а отже, і ЕРС E_a почнуть зростати.

Коли ЕРС $E_a = U$, машина не буде споживати з мережі струму (точка C), швидкість обертання якоря досягне значення $n_{хх}$ називаного *примежовою швидкістю*.

При подальшому збільшенні зовнішнього моменту на валу машини ЕРС E_a стане більше напруги, а в ланцюзі якоря знову виникне струм, але іншого напрямку. При цьому машина перейде в *генераторний режим* коли механічна енергія, затрачувана на обертання якоря, буде перетворюватися в електричну і надходити в мережу.

Перевід двигуна в генераторний режим використовується для гальмування двигуна, тому що в генераторному режимі електромагнітний момент є гальмуючим (рекуперативне гальмування).

Контрольні питання

1. Якою є будова машини постійного струму?
2. Які схеми збудження застосовують у машинах постійного струму?
3. В яких режимах працюють машини постійного струму?

4. Які існують типи обмоток якоря? Назвіть особливості їх укладання.
5. Від яких величин залежить ЕРС якоря в режимі генератора?
6. Як проявляється явище реакції якоря?
7. Наведіть характеристики машини в режимі генератора.
8. Поясніть роботу машини постійного струму в режимі двигуна.
9. Якими величинами визначається електромагнітний момент двигуна?
10. Як здійснюється пуск двигуна постійного струму?
11. Як забезпечити зміну напрямку обертання якоря?
12. Наведіть характеристики машини в режимі двигуна.
13. Як здійснюється регулювання швидкості обертання якоря?

Розділ 3

ТРАНСФОРМАТОРИ

3.1 ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА ТРАНСФОРМАТОРІВ

3.1.1 Призначення та класифікація трансформаторів

Трансформатором називається статичний електромагнітний апарат, призначений для перетворення однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну) систему змінного струму, що має інші характеристики.

Найбільше застосування трансформатори одержали для перетворення напруги в системах передачі електроенергії від електростанцій до промислових підприємств (рис.3.1.1).

Відомо, що передача електроенергії на далекі відстані здійснюється при високій напрузі, завдяки чому значно зменшуються втрати енергії в лінії.

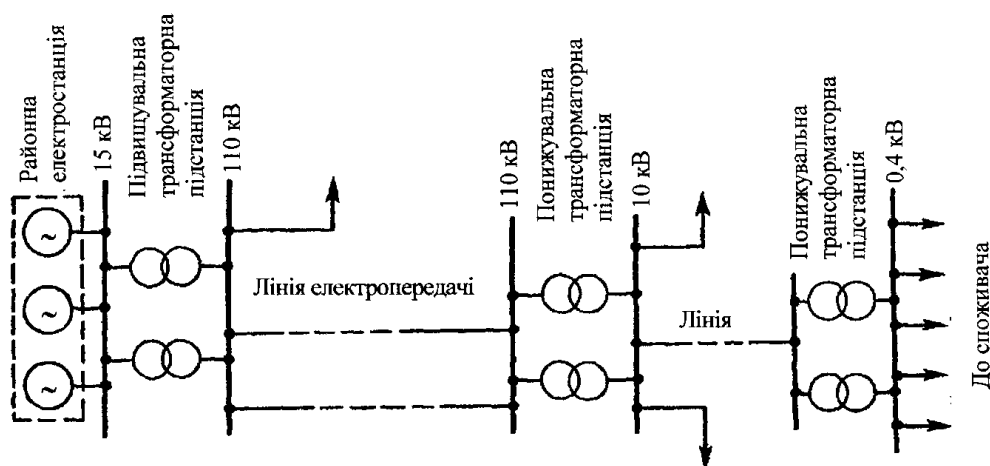


Рис. 3.1.1

Але оскільки напруга безпосередньо на виході електричних генераторів звичайно не перевищує 20 кВ, то на початку лінії електропередачі встановлюють *підвищувальні трансформатори*, що підвищують напругу змінного струму до потрібної величини. Ця напруга повинна бути тим вища, чим більша довжина лінії електропередачі і більша передана потужність. Наприклад, для передачі потужності 100 МВт на відстань 1000 км необхідна напруга близько 500 кВ.

У місцях розподілу електроенергії між споживачами встановлюють *понижувальні трансформатори*, що знижують напругу до необхідної величини, наприклад до 6 кВ, і, нарешті, у місцях споживання електроенергії напруга ще раз знижується за допомогою понижувальних трансформаторів до 220 чи 380 В та подається безпосередньо до електроприймачів підприємств і житлових приміщень.

Крім цього основного застосування, трансформатори використовуються в різних електропристроях (нагрівальних, зварювальних), у пристроях радіо, зв'язку, автоматики тощо.

Залежно від призначення трансформатори поділяються на силові загального застосування і спеціалізовані. Силові трансформатори загального застосування використовуються в системах передачі і розподілу електроенергії як підвищувальні чи понижувальні.

До спеціалізованих трансформаторів відносяться: силові спеціального призначення (пічні, випрямні, зварювальні, радіотрансформатори), автотрансформатори, вимірювальні й іспитові трансформатори, трансформатори для перетворення частоти тощо.

Трансформатори поділяються на *однофазні* і *багатофазні*, з останніх найбільше застосування мають трифазні трансформатори.

Крім того, трансформатор може бути двообмотковим, якщо він має дві обмотки, чи багатообмотковим, якщо він має більше двох обмоток на кожну фазу..

Залежно від способу охолодження трансформатори поділяються на *масляні*, занурені в масло, і *сухі*, що охолоджуються повітрям.

Однак, незважаючи на велику розмаїтість типів трансформаторів, принцип дії і фізичні процеси в них, власне кажучи, ті самі. Тому роботу трансформатора варто розглядати на основному типі трансформатора, за який прийнятий двообмотковий силовий трансформатор.

3.1.2 Принцип дії трансформаторів

Розглянемо принцип дії трансформатора на прикладі однофазного двообмоткового трансформатора, конструктивна схема якого подана на рис. 3.1.2.

Цей трансформатор складається з магнітопроводу і двох розташованих на ньому обмоток. Одна з обмоток підключається до джерела змінного струму G на напругу U_1 ; ця обмотка називається *первинною*. До іншої обмотки підключають споживача z_n , вона називається *вторинною*.

Дія трансформатора основана на явищі електромагнітної індукції. При підключенні первинної обмотки до джерела змінного струму в витках цієї обмотки протікає змінний струм i_1 , що створює в магнітопроводі змінний магнітний потік Φ . Замикаючись у магнітопроводі, цей потік зчіплюється з обома обмотками і індукує в них ЕРС:

у первинній обмотці

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt};$$

у вторинній обмотці

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

де w_1 і w_2 — число витків у первинній і вторинній обмотках трансформатора.

При підключенні навантаження z_H до виводів вторинної обмотки трансформатора під дією ЕРС e_2 в колі цієї обмотки створюється струм i_2 . При цьому на виводах вторинної обмотки встановлюється напруга U_2 .

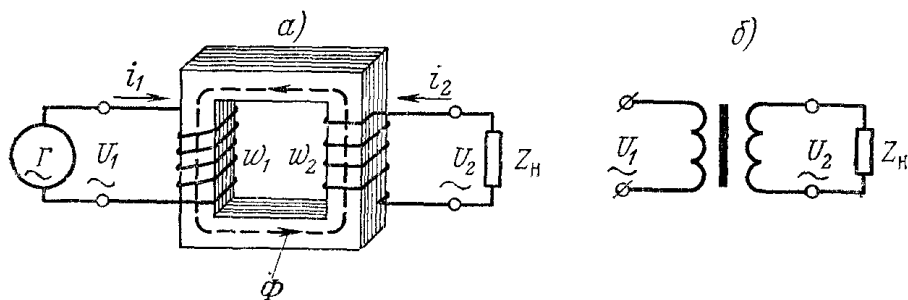


Рис. 3.1.2

У підвищувальних трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижувальних — $U_2 < U_1$.

ЕРС e_1 і e_2 можуть відрізнятись одна від одної через число витків в обмотках. Тому, застосовуючи обмотки з необхідним співвідношенням витків, можна виготовити трансформатор на будь-яке відношення напруг.

Обмотка трансформатора, що підключена до мережі з більш високою напругою, називається *обмоткою вищої напруги (ВН)*, обмотка, приєднана до мережі меншої напруги, називається *обмоткою нижчої напруги (НН)*.

Трансформатори мають властивість *зворотності*: той самий трансформатор може бути використаний як підвищувальний так і понижувальний, але звичайно трансформатор має визначене призначення: або він є підвищувальним, або понижувальним.

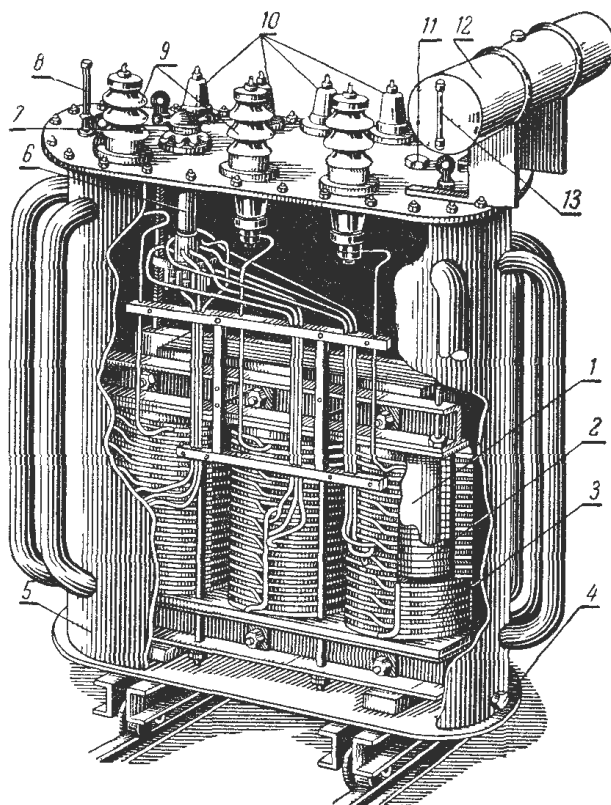


Рис 3.1.3

3.1.3 Будова трансформаторів

На рис 3.1.3 показана будова трифазного силового трансформатора. Основними частинами трансформатора є його магнітопровід і обмотки. Магнітопровід трансформатора виконується з листової електротехнічної сталі при товщині листів 0,35 чи 0,5 мм. Перед зборкою листи з двох сторін ізолюються лаком.

Така конструкція магнітопроводу дає можливість у значній мірі послабити в ньому вихрові струми. Частина магнітопроводу, на якій розташовуються обмотки, називається стрижнем (рис 3.4). Стрижні з'єднуються між собою ярмом.

Залежно від конструкції магнітопроводу трансформатори розділяються на два типи: стрижневий і броньовий. Найбільше поширення одержав *стрижневий* тип трансформатора (рис. 3.1.4).

Трансформатори *броньового* типу мають розгалужений магнітопровід (рис 3.1.5) з одним стрижнем і ярмами, що частково прикривають обмотки.

У трифазних трансформаторах застосовують *тристрижневий* магнітопровід. Конструкція такого магнітопроводу зображена на рис.3.1.6, тут три вертикально розташованих стрижні зв'язані між собою двома ярмами. У трансформаторах великої потужності застосовують *бронестрижневу* конструкцію магнітопроводу (рис 3.1.7), що, хоч і вимагає трохи підвищеної витрати електротехнічної сталі, але дозволяє зменшити висоту магнітопроводу, а отже, зменшити і висоту трансформатора. Це має велике значення при його перевезенні в зібраному виді.

За способом з'єднання стрижнів з ярмами розрізняють магнітопроводи *стикові* (рис 3.1.8, а) і *шихтовані* (рис 3.1.8, б) В стикових магнітопроводах стрижні і ярма збираються роздільно, а потім з'єднуються за допомогою кріпильних частин. Така конструкція магнітопроводу полегшує посадку обмоток на стрижні, тому що для цього досить зняти тільки верхнє ярмо. Але при шихтовій зборці магнітопроводу, коли листи (смуги) збираються внапуск, повітряний зазор у місці стику стрижнів і ярма може бути зроблений мінімальним, що значно знизить магнітний опір магнітопроводу. Крім того, механічна міцність шихтованого магнітопроводу набагато вище, ніж у стикового. Усе це привело до того, що шихтовані магнітопроводи одержали основне застосування.

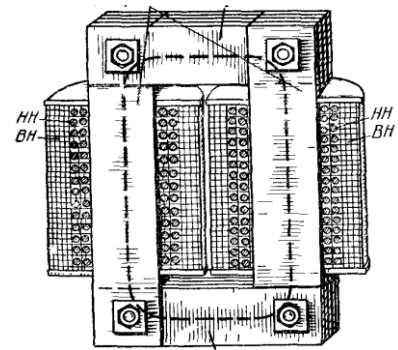


Рис. 3.1.4

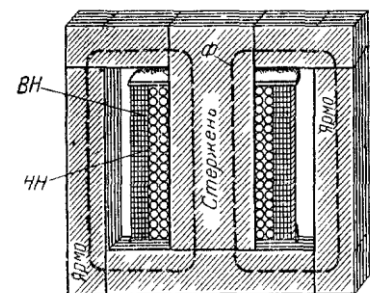


Рис. 3.1.5

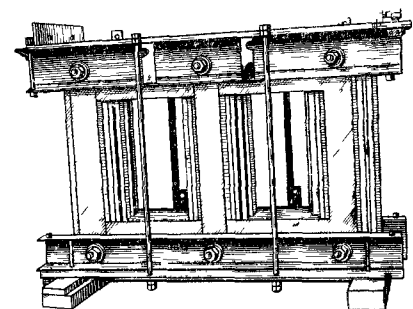


Рис. 3.1.6

Листи магнітопроводу стягуються за допомогою шпильок і накладок, ізольованих від листів ізоляційними шайбами і трубками.

Форма поперечного перерізу стрижнів залежить від потужності трансформатора: в невеликих трансформаторах застосовуються стрижні прямокутного перерізу, в трансформаторах середньої і великої потужності застосовуються стрижні східчастого перерізу з числом ступенів, що зростають зі збільшенням потужності трансформатора. Східчастий переріз стрижнів забезпечує краще використання площі в середині обмотки, тому що периметр східчастого стрижня наближається до окружності.

У трансформаторах великої потужності для поліпшення тепловіддачі між пакетами сталі магнітопроводу влаштовують вентиляційні канали.

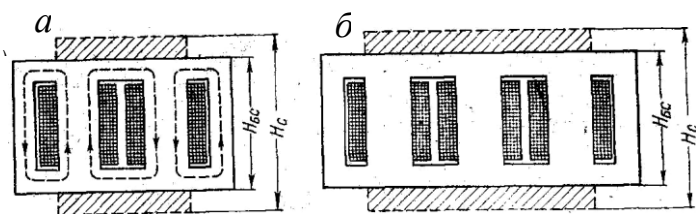


Рис. 3.1.7

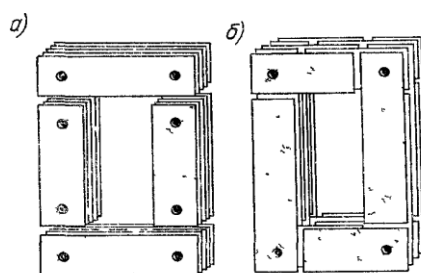


Рис. 3.1.8.

Обмотки трансформаторів виконують із проводів круглого і прямокутного перерізу, ізольованих бавовняною пряжею чи кабельним папером.

По взаємному розташуванню обмоток вищої і нижчої напруг і по способу їхнього розміщення на стрижнях розрізняють обмотки *концентричні* і *дискові* (що чергуються).

Концентричні обмотки виконують у виді циліндрів (рис. 3.1.9) і розміщують на стрижнях концентрично: ближче до стрижня — обмотка НН, що вимагає меншої електричної ізоляції від стрижня, потім іде шар ізоляції з картону чи паперу й обмотка ВН.

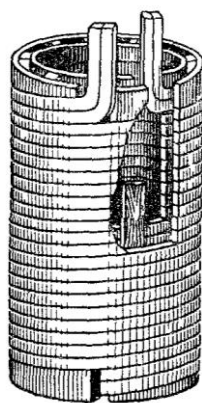


Рис. 3.1.9

У дискових обмотках дископодібні котушки НН і ВН розміщуються на стрижнях в порядку, що чергується. Дискові обмотки в порівнянні з концентричними більш трудомісткі у виготовленні і механічно менш міцні. Тому переважне поширення в трансформаторах одержали концентричні обмотки.

У масляних трансформаторах магнітопровід з обмотками поміщений у бак, наповнений трансформаторним маслом, що, омиваючи обмотки і магнітопровід, відбирає від них тепло і через стінки бака і труби радіатора віддає його в навколишнє середовище. Крім того, наявність масла забезпечує більш надійну роботу високовольтних трансформаторів, тому що електрична міцність масла набагато вища, ніж повітря.

Для збільшення охолоджуваної поверхні бака застосовують трубчасті баки. Подальше посилення охолодження досягається застосуванням радіаторних баків з повітряним охолодженням радіаторів (рис. 3.10). Для компенсації об'єму масла при зміні температури, а також для захисту масла трансформатора від окислювання і зволоження при контакті з повітрям у трансформаторах потужністю понад 50 кВА при напрузі понад 6 кВ застосовується розширник. Розширник являє собою циліндричну посудину, установлену на кришці бака та сполучену з останнім. Коливання рівня масла зі зміною його температури відбувається не в баці, що завжди заповнений маслом, а в розширнику, що взаємодіє з атмосферою.

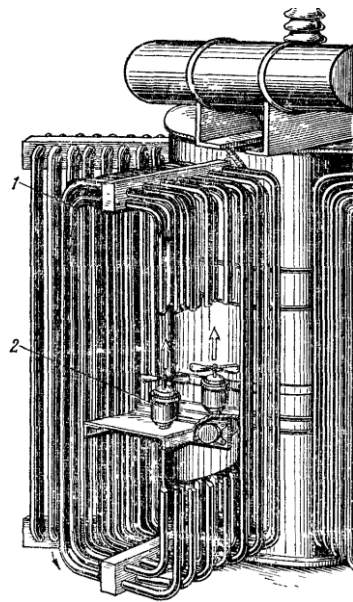


Рис. 3.1.10

У процесі роботи трансформаторів не виключена можливість виникнення в них явищ, що супроводжуються бурхливим виділенням газів, що веде до значного збільшення тиску всередині бака. Тому щоб уникнути ушкодження баків трансформатори потужністю 1000 кВА і вище забезпечуються *вихлопною трубою*, що встановлюється на кришці бака. Нижнім кінцем труба з'єднується з баком, а її верхній кінець закінчується фланцем, на якому укріплений скляний диск. При тиску, що перевищує безпечний для бака, скляний диск лопається і гази виходять назовні.

Трансформатори середньої і великої потужності забезпечуються *газовим реле*. При виникненні в трансформаторі значних ушкоджень, супроводжуваних частим виділенням газів (наприклад, при короткому замиканні між витками обмоток), газове реле спрацьовує і замикає контакти ланцюга керування вимикача. В результаті трансформатор відключається від мережі.

Вивід кінців обмоток з бака здійснюється за допомогою вивідних ізоляторів, що найчастіше виконуються з порцеляни і монтуються на кришці бака.

На трансформаторах є табличка, де зазначене наступне: номінальна потужність трансформатора в кіловольт-амперах; лінійні напруги в вольтах чи кіловольтах; лінійні струми при номінальній потужності; частота; число фаз; схема і група з'єднання обмоток; напруга короткого замикання; спосіб охолодження; режим роботи: тривалий чи короткочасний.

На табличці також зазначені: завод-виготовлювач, вага трансформатора, заводський номер.

3.2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Фізичні основи робочого процесу силових трансформаторів загального застосування, тобто трансформаторів, призначених для перетворення напруги змінного струму при незмінній частоті, розглядаються на прикладі однофазного трансформатора, а потім викладаються особливості роботи трифазних трансформаторів. Слід зазначити, що основи робочого процесу однофазного і трифазного трансформаторів у принципі не відрізняються одна від одної. Однак прийнятий порядок трохи полегшує виклад питання.

3.2.1 Рівняння електрорушійних сил

Основний магнітний потік Φ у магнітопроводі трансформатора зчеплений з витками обмоток w_1 і w_2 (рис. 3.2.1), завдяки чому в них наводяться ЕРС:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Припустимо, що магнітний потік Φ є синусоїдальною функцією часу, тобто

$$\Phi = \Phi_{\text{макс}} \sin \omega t$$

де $\Phi_{\text{макс}}$ — максимальне значення потоку.

Тоді, підставивши цей вираз у формулу ЕРС e_1 і диференціюючи, одержимо

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{\text{макс}} \cos \omega t.$$

Але оскільки $\cos \omega t = -\sin(\omega t - \pi/2)$, то

$$e_1 = \omega w_1 \Phi_{\text{макс}} \sin(\omega t - \pi/2).$$

За аналогією

$$e_2 = \omega w_2 \Phi_{\text{макс}} \sin(\omega t - \pi/2)$$

З отриманих формул випливає, що ЕРС e_1 і e_2 відстають по фазі від потоку Φ на кут $\pi/2$. Максимальне значення ЕРС e_1 дорівнює

$$E_{1\text{макс}} = \omega w_1 \Phi_{\text{макс}}.$$

Розділивши величину $E_{1\text{макс}}$ на $\sqrt{2}$ і підставивши $\omega=2\pi f$, одержимо формулу діючого значення ЕРС e_1

$$E_1 = \frac{E_{1\text{макс}}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_{\text{макс}} = 4,44 w_1 f \Phi_{\text{макс}},$$

де $\Phi_{\text{макс}}$ виражено в веберах, а E_1 — у вольтах.

Аналогічно для вторинної ЕРС

$$E_2 = 4,44w_2f\Phi_{\text{макс}}$$

Відношення ЕРС обмотки вищої напруги до ЕРС обмотки нижчої напруги називається *коефіцієнтом трансформації*

$$\hat{E} = \frac{E_1}{E_2}$$

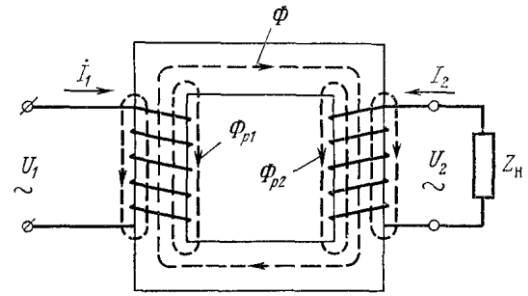


Рис. 3.2.1

Підставивши замість ЕРС E_1 і E_2 їх значення, одержимо

$$\hat{E} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Струми I_1 і I_2 в обмотках трансформатора, крім основного потоку Φ , створюють *магнітні потоки розсіювання* Φ_{p1} і Φ_{p2} .

Кожний з цих потоків зчеплений лише з витками власної обмотки та індукуює в ній ЕРС розсіювання: у первинній обмотці e_{p1} , а у вторинній e_{p2} . Діючі значення цих ЕРС пропорційні відповідним струмам в обмотках:

$$\left. \begin{aligned} -\dot{E}_{p1} &= \dot{I}_1 jx_1 ; \\ -\dot{E}_{p2} &= \dot{I}_2 jx_2 , \end{aligned} \right\}$$

де x_1 і x_2 — індуктивні опори розсіювання первинної і вторинної обмоток, Ом.

Знаки мінус свідчать про реактивний характер ЕРС розсіювання.

Таким чином, у кожній обмотці трансформатора індукується основна ЕРС і ЕРС розсіювання.

Розглянемо дію цих ЕРС в обмотках трансформатора.

У первинній обмотці ЕРС E_1 являє собою ЕРС самоіндукції, а тому вона спрямована проти первинної напруги U_1 , тобто знаходиться з нею у протифазі. В зв'язку з цим рівняння ЕРС для первинної обмотки має вигляд

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{p1}) + \dot{I}_1 r_1,$$

чи

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 jx_1 + \dot{I}_1 r_1.$$

Добуток $\dot{I}_1 r_1$ являє собою активне спадання напруги в первинній обмотці.

Цей вираз є рівнянням рівноваги ЕРС, відповідно до якого напруга \dot{U}_1 врівноважується сумою протидіючих ЕРС

Звичайно напруги $\dot{I}_1 jx_1$ і $\dot{I}_1 r_1$ малі, а тому, з деяким наближенням, можна вважати, що підведена до трансформатора напруга \dot{U}_1 врівноважується ЕРС \dot{E}_1

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1).$$

У вторинній обмотці струм I_2 замкнутого кола залежить від величини ЕРС E_2 , що в значній частині йде на створення напруги на виводах вторинної обмотки

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_H.$$

Частина ЕРС E_2 що залишилася, йде на компенсацію ЕРС розсіювання й активного спадання напруги у вторинній обмотці $\dot{I}_2 r_2$. Таким чином, рівняння ЕРС для вторинного кола

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + (-\dot{E}_{P1}) + \dot{I}_2 r_2,$$

чи

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 jx_2 - \dot{I}_2 r_2.$$

3.2.2 Рівняння намагнічувальних сил

Припустимо, що трансформатор знаходиться в режимі холостого ходу (рис. 3.2.2, а), тобто до затисків його первинної обмотки підведена напруга U_1 , а вторинна обмотка розімкнута ($I_2=0$).

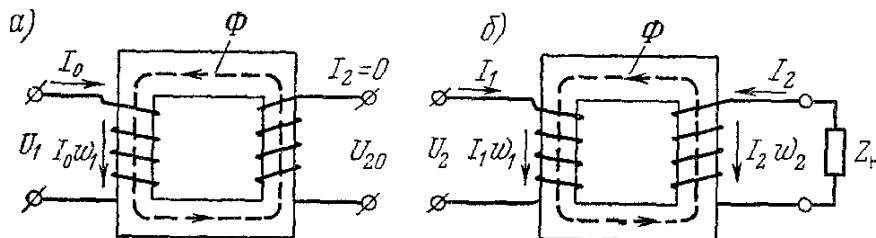


Рис 3.2.2

Струм I_0 у первинній обмотці при цих умовах називається *струмом холостого ходу*. НС, що створена цим струмом $I_0 \omega_1$, наводить в магнітопроводі трансформатора основний магнітний потік, максимальне значення якого визначається виразом

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{I_0 \omega_1}{R_M} \sqrt{2},$$

де R_M — магнітний опір магнітопроводу.

При замиканні вторинної обмотки на навантаження Z_H (рис. 3.2.2, б) в ній виникає струм I_2 . При цьому струм у первинній обмотці збільшується до значення I_1 .

Тепер потік $\Phi_{\text{макс}}$ створюється дією двох НС: $I_1 w_1$ і $I_2 w_2$

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{I_1 w_1 + I_2 w_2}{R_M} \sqrt{2}.$$

Але величину потоку $\Phi_{\text{макс}}$ можна також визначити як

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{E_1}{4,44 w_1 f} \sqrt{2}$$

чи, приймаючи до уваги, що $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, одержимо:

$$\Phi_{\text{макс}} \approx \frac{U_1}{4,44 w_1 f}.$$

З цього виразу випливає, що основний потік $\Phi_{\text{макс}}$ не залежить від навантаження трансформатора, тому що напруга U_1 у всьому діапазоні навантаження трансформатора залишається незмінною.

$$\frac{\dot{I}_0 w_1}{R_M} \sqrt{2} = \frac{\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2}{R_M} \sqrt{2},$$

чи

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2.$$

Тут $\dot{I}_0 w_1$ — НС, яка необхідна для створення в магнітопроводі трансформатора основного магнітного потоку.

Цей вираз являє собою *рівняння намагнічувальних сил трансформатора*. З цього рівняння випливає, що сума НС первинної обмотки $I_1 w_1$ і НС вторинної обмотки $I_2 w_2$ дорівнює постійній величині – НС холостого ходу $I_0 w_1$.

Розділивши обидві частини рівності на w_1 , одержимо

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_0,$$

чи

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0,$$

де $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 w_2 / w_1$ — *вторинний струм, приведений до числа витків первинної обмотки*, тобто струм, що в обмотці з числом витків w_1 створює таку ж НС, що і струм I_2 у вторинній обмотці ($\dot{I}'_2 w_1 = \dot{I}_2 w_2$).

Тоді одержуємо вираз

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2),$$

названий *рівнянням струмів трансформатора*. З цього рівняння випливає, що первинний струм I_1 можна розглядати як суму двох складових: одна з них (I_0) створює основний магнітний потік, а інша I_2' компенсує розмагнічувальну дію вторинного струму.

Фізично це пояснюється наступним. Оскільки ЕРС вторинної обмотки E_2 , являє собою ЕРС взаємоіндукції, то струм I_2 , створений цією ЕРС при підключенні навантаження, відповідно до правила Ленца, впливає на магнітопровід трансформатора. Іншими словами, струм I_2 створює НС $I_2 w_2$, спрямовану зустрічно НС первинної обмотки $I_0 w_1$.

Але через те, що основний магнітний потік в магнітопроводі залишається практично незмінним, то дія вторинного струму, що розмагнічує, викликає збільшення первинного струму до значення I_1 , що перевищує струм I_0 на величину $(-I_2')$, необхідну для компенсації дії вторинного струму, що розмагнічує

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1 + (-\dot{I}_2') w_2 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1.$$

Таким чином, будь-яка зміна величини струму у вторинному ланцюзі трансформатора супроводжується відповідною зміною первинного струму.

Внаслідок перемагнічування сталі в магнітопроводі трансформатора виникають магнітні втрати енергії від гістерезису і вихрових струмів. Потужність цих втрат еквівалентна активній складовій струму холостого ходу. Отже, струм холостого ходу поряд з реактивною складовою I_{op} , що створює основний магнітний потік, має ще й активну складову I_{oa}

$$I_0 = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2}.$$

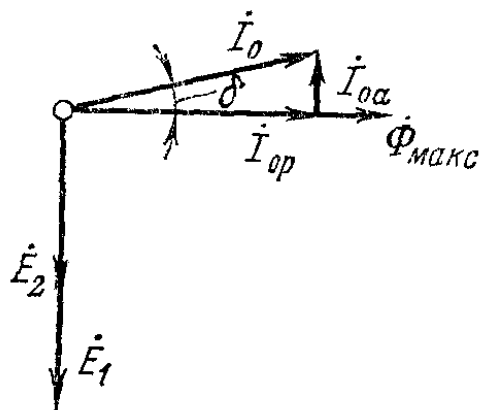


Рис. 3.2.3

Звичайно активна складова I_{oa} не перевищує 10% від струму I_0 і тому мало впливає на величину цього струму. На рис. 3.2.3 представлена векторна діаграма, на якій показані вектори струму холостого ходу і його складових. Кут δ , на який вектор основного магнітного потоку Φ_{\max} відстає по фазі від струму холостого ходу I_0 , називається *кутом магнітних втрат*. Неважко помітити, що цей кут збільшується з ростом активної складової струму холостого ходу I_{oa} , тобто з ростом магнітних втрат у магнітопроводі.

Величина струму холостого ходу в трансформаторах великої і середньої потужності відповідно складає 2...10% від номінального первинного струму. Тому при навантаженні, близькому до номінального, зневажаючи величиною струму I_0 , можна записати

$$\frac{I_1}{I_2} = -\frac{w_2}{w_1},$$

тобто струми в обмотках трансформатора обернено пропорційні числам витків цих обмоток: величина струму більша в обмотці з меншим числом витків і навпаки.

3.2.3 Трифазний трансформатор

Трансформування трифазної системи напруг можна здійснити трьома однофазними трансформаторами, з'єднаними в трансформаторну групу (рис. 3.2.4, а). Однак відносна громіздкість, велика вага і підвищена вартість є недоліками трансформаторної групи. Тому вона застосовується тільки в установках великої потужності з метою зменшення ваги і габаритів одиниці

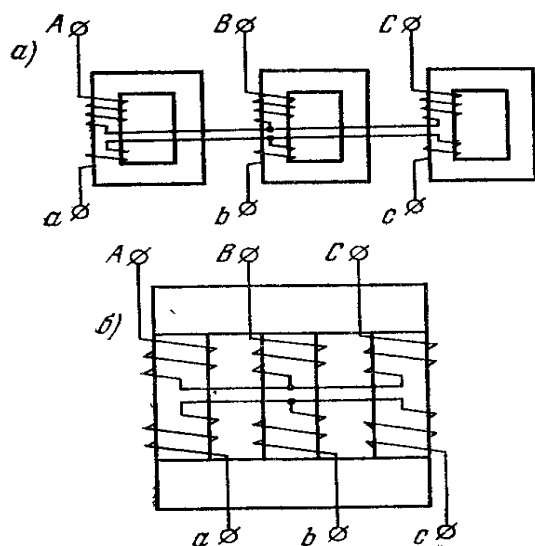


Рис. 3.2.4

устаткування, що важливо при його монтажі і транспортуванні.

В установках потужністю приблизно до 60000 кВА звичайно застосовуються трифазні трансформатори (рис. 3.2.4, б), у яких обмотки розташовані на трьох стрижнях, об'єднаних у загальний магнітопровід двома ярами. Але отриманий у такий спосіб магнітопровід є несиметричним.

Магнітний опір потоку середньої фази Φ_B менше магнітного опору потоків крайніх фаз Φ_A і Φ_C (рис. 3.2.5, а).

Оскільки до первинних обмоток трифазного трансформатора підводиться симетрична система напруг \dot{U}_A , \dot{U}_B і \dot{U}_C , то в магнітопроводі трансформатора виникають магнітні потоки Φ_A , Φ_B і Φ_C , що утворюють також симетричну систему (рис. 3.2.5, б). Однак внаслідок магнітної несиметрії магнітопроводу, намагнічувальні струми окремих фазних обмоток не однакові: намагнічувальні струми крайніх фаз (I_{0A} і I_{0C}) більше струму середньої фази (I_{0B}). Крім того, струми крайніх фаз I_{0A} і I_{0C} виявляються зрушеними по фазі щодо відповідних потоків Φ_A і Φ_C на кут α . Таким чином, при симетричній системі трифазної напруги, підведеної до трансформатора, струми холостого ходу утворюють несиметричну систему (див. рис. 3.2.5, в).

Для зменшення магнітної несиметрії тристрижневого магнітопроводу, тобто зменшення магнітного опору потокам крайніх фаз, переріз ярем роблять на 10—15% більше перерізу стрижнів, що зменшує їхній магнітний опір.

Несиметрія струмів холостого ходу тристрижневого трансформатора практично не відбивається на роботі трансформатора, тому що навіть при невеликому навантаженні розходження у величинах струмів \dot{I}_A , \dot{I}_B і \dot{I}_C практично не виявляється.

Обмотки фаз трифазного трансформатора можна з'єднувати або зіркою, або трикутником.

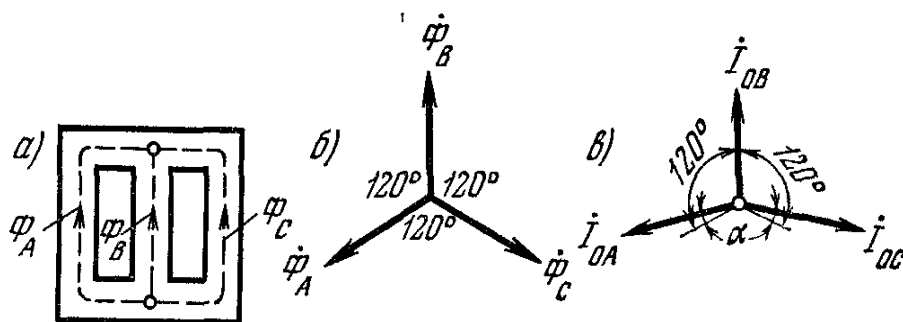


Рис. 3.2.5

Схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів позначають дробом, вказуючи в чисельнику схему з'єднання обмоток вищої напруги, а в знаменнику — обмоток нижчої напруги.

При з'єднанні обмоток зіркою лінійна напруга більше фазного ($U_L = \sqrt{3}U_\phi$), а при з'єднанні обмоток трикутником лінійна напруга дорівнює фазній ($U_L = U_\phi$). З цього випливає, що відношення лінійних напруг у трифазному трансформаторі визначається не тільки відношенням чисел витків фазних обмоток, але і схемою їхнього з'єднання.

3.3 РОБОЧІ ВЛАСТИВОСТІ ТРАНСФОРМАТОРА

3.3.1 Режим холостого ходу

Холостим ходом називають режим роботи трансформатора при розімкнутій вторинній обмотці ($z_i = \infty$, $I_2 = 0$). У цьому випадку рівняння ЕРС і струмів приймають вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_0 jx_1 + \dot{I}_0 r_1; \\ \dot{U}'_{20} &= \dot{E}'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0. \end{aligned} \right\}$$

Оскільки корисна потужність при роботі трансформатора вхолосту дорівнює нулю, потужність на вході трансформатора в режимі холостого ходу P_0 витрачається на магнітні втрати в магнітопроводі p_c і електричні втрати в міді однієї лише первинної обмотки ($I_0^2 r_1$). Однак через невелику величину струму I_0 , що звичайно не перевищує 2—10% від $I_{1н}$, електричними втратами $I_0^2 r_1$ можна зневажити і вважати, що вся потужність холостого ходу являє собою потужність магнітних втрат у сталі магнітопроводу. Тому магнітні втрати в трансформаторі прийнято називати *втратами холостого ходу*.

На рис. 3.3.1, *a* і *б* представлена схема заміщення і векторна діаграма трансформатора в режимі холостого ходу. При дослідженні властивостей

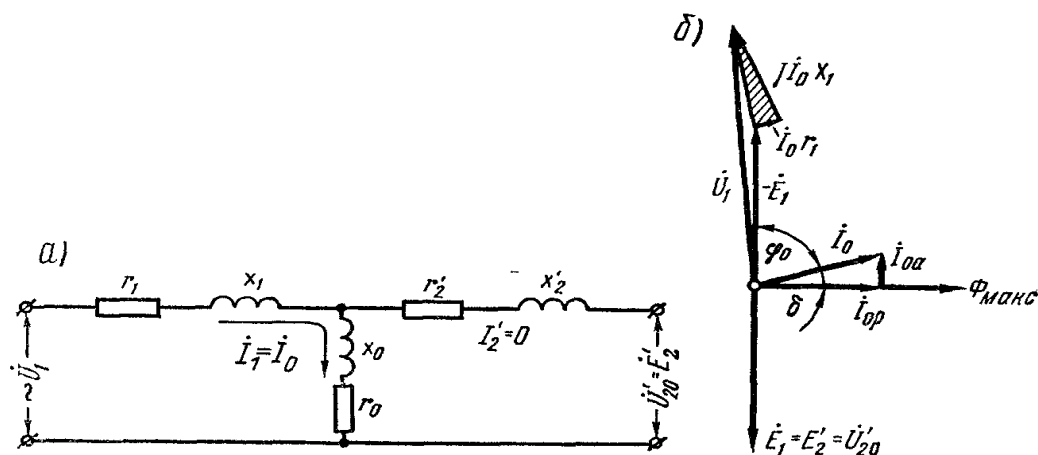


Рис. 3.3.1

трансформаторів чи при їхніх випробуваннях проводять *дослід холостого ходу*, у результаті якого визначають деякі параметри трансформатора.

Дослід проводиться за схемою рис. 3.3.2. Комплект вимірювальних

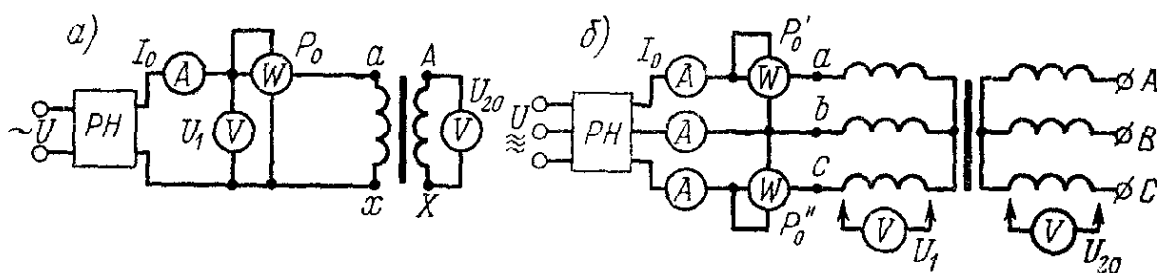


Рис. 3.3.2

приладів, включених у схему, дає можливість виміряти напруги U_0 і U_{20} , струм I_0 і потужність P_0 .

Напругу до первинної обмотки підводять через регулятор напруги PH , за допомогою якого напругу на вході трансформатора поступово підвищують до значення $U_1=1,1U_{1н}$. При цьому знімають показання приладів, а потім будують *характеристики холостого ходу*, що являють собою залежність струму I_0 , потужності P_0 і коефіцієнта потужності $\cos\phi_0$ від первинної напруги U_1 (рис. 3.3.3).

У випадку трифазного трансформатора характеристики холостого ходу будують по середніми (фазними) значеннями струму і напруги для трьох фаз:

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3};$$

$$U_1 = \frac{U_{1A} + U_{1B} + U_{1C}}{3}.$$

Коефіцієнт потужності визначають за формулами:
для однофазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0};$$

для трифазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P'_0 + P''_0}{3U_1 I_0} = \frac{P_0}{3U_1 I_0},$$

де U_1 і I_0 – фазні значення напруги і струму; P'_0 і P''_0 — показання однофазних ватметрів.

За даними досліду холостого ходу можна визначити наступні величини:

1) коефіцієнт трансформації

$$K = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{w_1}{w_2}$$

2) струм холостого ходу при U_{1H} , що звичайно виражають у відсотках від номінального первинного струму

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} 100$$

3) втрати холостого ходу P_0 .

4) параметри гілки намагнічування схеми заміщення (рис. 3.3.1)

$$\left. \begin{aligned} z_0 &= \frac{U_{1H}}{I_0}; \\ r_0 &= z_0 \cos \varphi_0; \\ x_0 &= \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \end{aligned} \right\}$$

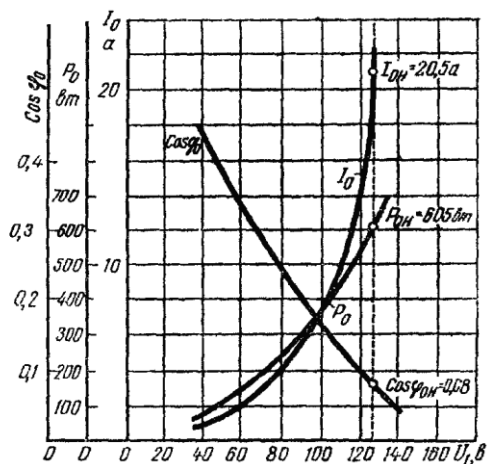


Рис. 3.3.3

3.3.2 Дослід короткого замикання

Коротке замикання трансформатора представляє такий режим, коли вторинна обмотка замкнута накоротко ($z_n=0$). При цьому вторинна напруга U_2 дорівнює нулю.

В умовах експлуатації, коли до трансформатора підведена номінальна напруга $U_{1н}$, коротке замикання є аварійним режимом і становить велику небезпеку для трансформатора.

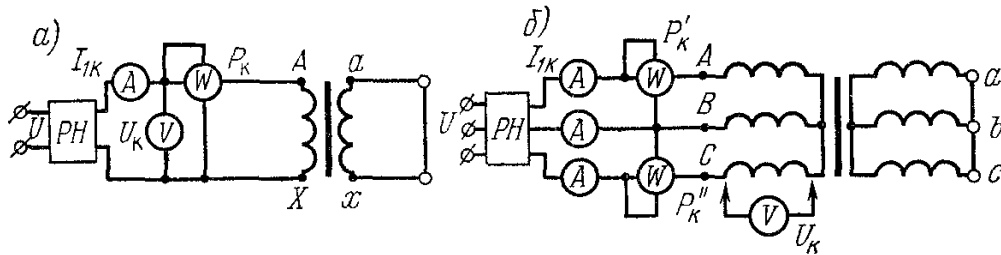


Рис. 3.3.4

Практичне значення має дослід короткого замикання, при якому вторинну обмотку трансформатора замикають накоротко (рис. 3.3.4), а до первинної обмотки підводять знижену напругу, поступово підвищуючи її за допомогою регулятора напруги до деякого значення U_k , при якому струми короткого замикання в обмотках трансформатора стають рівними номінальним струмам: $I_{1к}=I_{1н}$ і $I_{2к}=I_{1н}$. У цьому випадку знімають показання приладів і будують характеристики короткого замикання: $I_{1к}$; $\cos\varphi_k$ і $P_k=f(U_k)$ (рис. 3.3.5).

У випадку трифазного трансформатора значення фазних напруг і струмів будуть середніми для трьох фаз

$$U_k = \frac{U_{kA} + U_{kB} + U_{kC}}{3};$$

$$I_k = \frac{I_{kA} + I_{kB} + I_{kC}}{3}.$$

За цими значеннями обмірюваних величин визначають $\cos\varphi_k$

$$\cos\varphi_k = \frac{P'_k + P''_k}{3U_k I_{1k}} = \frac{P_k}{3U_k I_{1k}}.$$

Напруга, при якій струми в обмотках короткозамкнутого трансформатора дорівнюють номінальним, називається *номінальною напругою короткого замикання* і звичайно виражається у відсотках від $U_{1н}$

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1н}} \cdot 100.$$

Відповідно до ДСТУ, напруга короткого замикання приводиться до робочої температури 75°C. Для силових трансформаторів U_k складає 5—10% від номінальної первинної напруги.

Магнітний потік у магнітопроводі трансформатора пропорційний первинній напрузі U_1 . Але оскільки ця напруга при досліді короткого замикання складає не більше 10% від $U_{1н}$, то таку ж невелику величину складає магнітний потік. Для створення такого магнітного потоку потрібно настільки малий струм, що величиною його можна зневажити.

У цьому випадку рівняння струмів приймає вид

$$\dot{I}_{1k} = -\dot{I}'_{2k},$$

а схема заміщення трансформатора для досліді короткого замикання не містить гілки намагнічування (рис. 3.3.6, а). Для цієї схеми заміщення можна записати рівняння ЕРС

$$\dot{U}_k = \dot{I}_{1k}(r_1 + r'_2) + j\dot{I}_{1k}(x_1 + x'_2),$$

чи

$$\dot{U}_k = \dot{I}_{1k}r_k + j\dot{I}_{1k}x_k = \dot{I}_{1k}Z_k,$$

де Z_k — опір трансформатора при досліді короткого замикання

$$Z_k = r_k + jx_k.$$

Тут r_k і x_k — активний і індуктивний опори трансформатора при досліді короткого замикання.

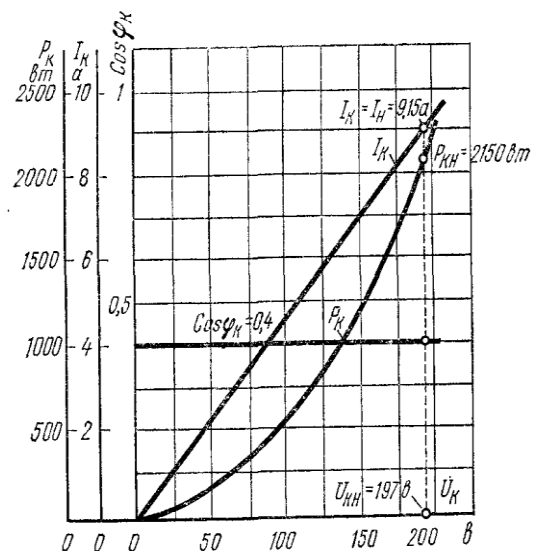


Рис.3.3.5

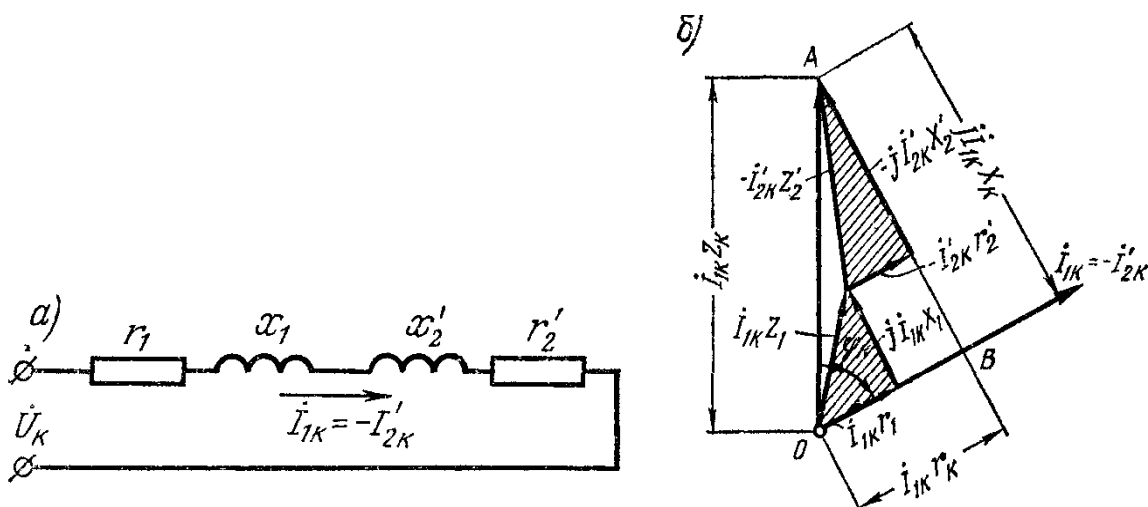


Рис. 3.3.6

Скориставшись рівняннями струмів і ЕРС для досліді короткого замикання, побудуємо векторну діаграму трансформатора при короткому

замиканні (рис. 3.3.6, б). Побудову діаграми почнемо з вектора $\dot{U}_k = \dot{I}_{1k} Z_k$. Потім під кутом φ_k до вектора \dot{U}_k проводимо вектор струму $\dot{I}_{1k} = -\dot{I}'_{2k}$. Побудувавши вектори спадань напруги в первинній обмотці $\dot{I}_{1k} r_1$ і $j\dot{I}_{1k} x_1$ та у вторинній обмотці $\dot{I}_{1k} r'_2$ і $j\dot{I}_{1k} x'_2$, одержимо прямокутний трикутник AOB , що називається *трикутником короткого замикання*. Сторони цього трикутника дорівнюють

$$\begin{aligned} OB &= \dot{I}_{1k} r_1 + \dot{I}_{1k} r'_2 = \dot{I}_{1k} r_k = \dot{U}_{ka} ; \\ BA &= \dot{I}_{1k} jx_1 + \dot{I}_{1k} jx'_2 = \dot{I}_{2k} jx_k = \dot{U}_{kp} ; \\ OA &= \dot{I}_{1k} Z_k = \dot{U}_k . \end{aligned}$$

Тут U_{ka} і U_{kp} —активна і реактивна складові напруги короткого замикання

$$U_k = \sqrt{U_{ka}^2 + U_{kp}^2}.$$

Параметри схеми заміщення при досліді короткого замикання визначаються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} z_k &= \frac{U_k}{I_k} ; \\ r_k &= z_k \cos \varphi_k ; \\ x_k &= \sqrt{z_k^2 - r_k^2} . \end{aligned} \right\}$$

Отримані значення опорів приводять до робочої температури 75°C

$$r_{k75} = r_k \frac{310}{235 + \theta_1},$$

де θ_1 — температура обмоток під час досліду.

Оскільки при досліді короткого замикання основний потік $\Phi_{\text{макс}}$ складає усього лише кілька відсотків у порівнянні з його значенням при номінальній первинній напрузі, то величиною магнітних втрат, викликаних цим потоком, можна зневажати. Отже, можна вважати, що потужність P_k , споживана трансформатором при досліді короткого замикання, йде цілком на покриття електричних втрат в обмотках трансформатора

$$P_k = I_{1k}^2 r_1 + I_{1k}^2 r_2 = I_{1k}^2 (r_1 + r_2) = I_{1k}^2 r_{k75}.$$

3.3.3. Втрати та коефіцієнт корисної дії трансформатора

При роботі навантаженого трансформатора в ньому мають місце магнітні й електричні втрати.

Магнітні втрати, тобто втрати в магнітопроводі трансформатора, складаються з втрат на гістерезис і вихрові струми. Сумарна величина магнітних втрат приймається рівною втратам холостого ходу:

$$p_c + p_e + p_{ex} = P_0.$$

Величина магнітних втрат залежить від частоти струму f і від значень магнітної індукції B у стрижні і ярмі.

Можна вважати, що $P_0 \propto B^2$. При $U_1 = \text{const}$ втрати P_0 від навантаження не залежать, а тому їх називають постійними.

Електричні втрати, тобто втрати в обмотках трансформатора, зв'язані з їхнім нагріванням, називають змінними втратами, тому що величина цих втрат прямо пропорційна квадрату струму в обмотках. Величина електричних втрат приймається рівною втратам короткого замикання

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 x_2 = I_k^2 r_{k75} = P_k.$$

Якщо відома потужність короткого замикання при номінальному струмі, то електричні втрати можна визначити за формулою

$$P_e = \beta^2 P_{кн}.$$

Сумарні втрати в трансформаторі

$$\sum p = P_{0н} + \beta^2 P_{кн}.$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора являє собою відношення активної потужності P_2 , що відбирається від трансформатора, до активної потужності P_1 , що підводиться до трансформатора

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

Потужність P_2 знаходиться за формулою

$$P_2 = m I_2 U_2 \cos \phi_2,$$

чи

$$P_2 = \beta S_n \cos \phi_2,$$

де $S_n = m I_{2н} U_{2н}$ — номінальна потужність, кВА.

Але потужність $P_1 = P_2 + \sum p$, тоді ККД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}$$

Підставивши в цей вираз значення P_2 і значення $\sum p$, одержимо

$$\eta = 1 - \frac{P_{0н} + \beta^2 P_{кн}}{\beta S_n \cos \phi_2 + P_{0н} + \beta^2 P_{кн}}.$$

Величина ККД залежить від навантаження трансформатора. Крім того, ККД тим більше, чим вище $\cos\varphi_2$.

Максимальне значення ККД відповідає такому навантаженню, при якому магнітні втрати рівні електричним

$$P_{0n} = \beta'^2 P_{кн}.$$

Звідси значення коефіцієнта навантаження, що відповідає максимальному ККД, дорівнює

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_{0n}}{P_{кн}}}.$$

Звичайно ККД має максимальне значення при $\beta'=0,5—0,6$.

Завдяки відсутності в трансформаторі обертових частин його ККД вище, ніж в електричних машин. У трансформаторах великої потужності ККД досягає 98—99%.

3.4 СПЕЦІАЛЬНІ ТИПИ ТРАНСФОРМАТОРІВ

3.4.1 Трьохобмотковий трансформатор

У трьохобмотковому трансформаторі є три електрично не зв'язані одна з одною обмотки, з яких одна є первинною, а дві інші - вторинними (рис. 3.3.7).

Принцип роботи трьохобмоткового трансформатора, власне кажучи, не відрізняється від принципу роботи звичайного двохобмоткового трансформатора.

Первинна обмотка цього трансформатора є намагнічуючою і створює в магнітопроводі магнітний потік, що пронизує дві вторинні обмотки і наводить у них ЕРС E_2 і E_3 . Зневажаючи величиною струму холостого ходу, можна записати рівняння струмів трьохобмоткового трансформатора

$$\dot{I}_1 = -(\dot{I}'_2 + \dot{I}'_3),$$

з якого випливає, що первинний струм трьохобмоткового трансформатора дорівнює не арифметичній, а геометричній сумі приведених вторинних струмів. З огляду на цю рівність, а також і те, що навантаження на вторинні обмотки досягають номінального значення не одночасно, первинна обмотка трьохобмоткового трансформатора розраховується на таку потужність, що повинна бути менше суми номінальних потужностей обох вторинних обмоток.

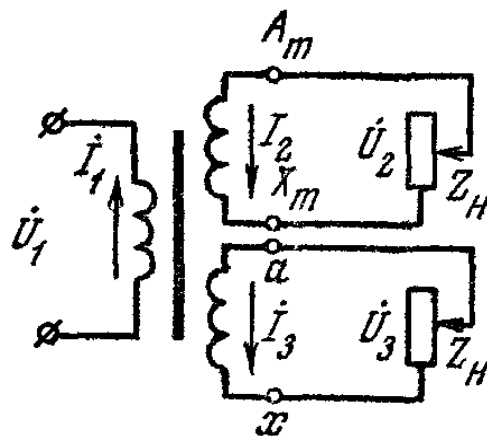


Рис. 3.3.7

Доцільність застосування трьохобмоткових трансформаторів пояснюється ще і тим, що один трьохобмотковий трансформатор фактично замінює два двохобмоткових трансформатори.

Наявність магнітного зв'язку між вторинними обмотками трьохобмоткового трансформатора веде до їх взаємного впливу. Так, при зміні струму I_2 змінюється не тільки напруга U_2 , але і напруга U_3 .

Трьохобмоткові трансформатори (однофазні і трифазні) встановлюють на трансформаторних підстанціях.

За таким же принципом влаштовані багатообмоткові трансформатори малої потужності, що застосовуються у пристроях радіо, зв'язку й автоматики.

3.4.2 Автотрансформатор

Автотрансформатор має всього лише одну обмотку, частина витків якої є загальною для первинного і вторинного ланцюгів. На рис. 3.39 подана схема понижуючого автотрансформатора, де загальною частиною обмотки є ділянка ax , струм у якій I_{12} . З огляду на те, що струми I_1 і I_2 знаходяться в протифазі, одержимо наступний вираз струму I_{12}

$$I_{12} = I_2 - I_1.$$

Звідси випливає, що величина струму в загальній частині обмотки дорівнює різниці струмів I_1 і I_2 .

Якщо коефіцієнт трансформації автотрансформатора дещо більше

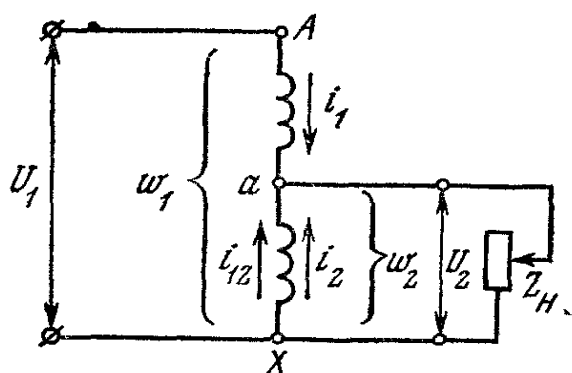


Рис. 3.3.8

одиниці, то струми I_1 і I_2 мало відрізняються один від одного, а їхня різниця складає невелику величину. Це дозволяє виконати частину ax обмотки автотрансформатора з проводу меншого перерізу. Якщо зневажити втратами в автотрансформаторі, то можна прийняти, що потужність на вході $S_1 = I_1 U_1$ і потужність на виході $S_2 = I_2 U_2$ приблизно рівні. Ця потужність $S_1 \approx S_2$

називається *прохідною потужністю* $S_{пр}$. Крім того, розрізняють ще *розрахункову потужність* $S_{розн}$, що становить собою потужність, передану з первинного у вторинний ланцюг магнітним полем. Розрахунковою цю потужність називають тому, що розміри і вага трансформатора залежать від величини цієї потужності. У трансформаторі вся прохідна потужність є розрахунковою, тому що між обмотками трансформатора існує винятково лише магнітний зв'язок.

Але в автотрансформаторі між первинним і вторинним ланцюгами, крім магнітного зв'язку, існує ще й електричний зв'язок. А тому розрахункова потужність складає лише частину прохідної потужності, а інша частина цієї

потужності переноситься з первинної у вторинний ланцюг за рахунок електричного зв'язку між ланцюгами, без участі магнітного поля.

У підтвердження цього розкладемо прохідну потужність автотрансформатора $S_{np} = I_2 U_2$ на складові:

$$S_{np} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_e + S_{розр}.$$

Тут $S_e = U_2 I_1$ — потужність, що передана з первинного ланцюга автотрансформатора у вторинний завдяки електричному зв'язку між цими ланцюгами. Таким чином, розрахункова потужність в автотрансформаторі $S_{розр} = I_2 U_{12}$ складає лише частину прохідної потужності.

Це дає можливість для виготовлення автотрансформатора використовувати магнітопроводи меншого перерізу, чим у трансформаторі рівної потужності.

У зв'язку з цим середня довжина витка обмотки також стає менше, а отже, зменшується витрата міді на виконання обмотки автотрансформатора. Одночасно зменшуються магнітні й електричні втрати, а ККД автотрансформатора підвищується.

Таким чином, автотрансформатор у порівнянні з трансформатором рівної потужності має такі переваги: менша витрата активних матеріалів (мідь і електротехнічна сталь), менші розміри, більш високий ККД, менша вартість.

Зазначені переваги автотрансформатора тим значніші, чим більша потужність S_e , а отже, чим менша розрахункова частина прохідної потужності. Величина потужності S_e обернено пропорційна коефіцієнту трансформації автотрансформатора K_A

$$S_e = S_{np} \frac{1}{K_A}.$$

З графіка $\frac{S_e}{S_{np}} = f(K_A)$ (рис. 3.3.9) видно, що застосування

автотрансформатора дає помітні переваги в порівнянні з двохобмотковим трансформатором лише при невеликих значеннях коефіцієнтів трансформації. Наприклад, при $K_A = 1$ вся потужність автотрансформатора передається у вторинний ланцюг за рахунок електричного зв'язку між ланцюгами $S_e / S_{np} = 1$.

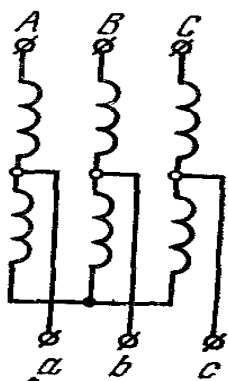


Рис. 3.3.10

Найбільш доцільне застосування автотрансформаторів з коефіцієнтом трансформації $K_A \leq 2$.

При більшій величині коефіцієнта трансформації переважне значення мають недоліки автотрансформатора, що полягають у наступному:

1) великі струми короткого замикання у випадку понижуючого автотрансформатора;

2) електричний зв'язок сторони ВН зі стороною НН; вимагає посиленої електричної ізоляції всієї обмотки;

3) при використанні автотрансформаторів у схемах зниження напруги між проводами мережі нижчої напруги і землею виникає напруга, що приблизно рівна напрузі між проводом і землею на стороні вищої напруги, що неприпустимо за умовами безпеки експлуатації установок.

Автотрансформатори можуть бути підвищувальними і понижуючими, однофазними і трифазними. В останніх обмотки звичайно з'єднуються зіркою (рис. 3.3.10).

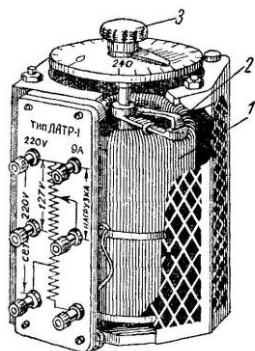


Рис. 3.3.11

Поширення одержали автотрансформатори зі змінним коефіцієнтом трансформації. У цьому випадку автотрансформатор забезпечується пристроєм, що дозволяє регулювати величину вторинної напруги шляхом зміни числа витків. Здійснюється це або перемикачем, або за допомогою ковзного контакту (щітки), що переміщується безпосередньо по зачищених від ізоляції витках обмотки. Такі автотрансформатори називаються регуляторами напруги і можуть бути як однофазними (тип РНО) (рис. 3.3.11), так і трифазними (тип РНТ).

3.4.3 Трансформатор для електродугового зварювання

Трансформатор для електродугового зварювання являє собою однофазний понижуючий трансформатор, що перетворює напругу мережі 220 чи 380 В у напругу 60—70 В, необхідну для стійкого горіння електричної дуги. Через те, що опір електричної дуги дуже малий, зварювальний трансформатор працює в режимі, близькому до короткого замикання. Тому для обмеження величини струму у вторинне коло трансформатора послідовно включають реактивну котушку РК із розсувним осердям (рис. 3.3.12, а).

Наявність у схемі цієї котушки впливає на форму зовнішньої характеристики трансформатора, роблячи її більш крутоспадаючою

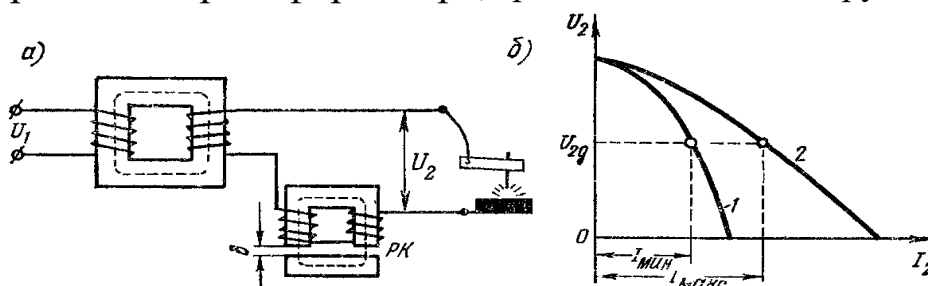


Рис. 3.3.12

(рис. 3.3.12, б). Змінюючи величину повітряного зазору у магнітному ланцюзі реактивної котушки, можна дуже плавно змінювати величину індуктивного опору котушки. При цьому змінюється кут нахилу зовнішньої характеристики, а отже, і величина струму: мінімальному зазору відповідає

найменший струм (крива 1), а максимальному зазору — найбільший струм (крива 2).

3.4.4 Вимірювальні трансформатори напруги і струму

Вимірювальні трансформатори застосовуються для розширення меж виміру електровимірювальних приладів у ланцюгах змінного струму і забезпечення безпеки обслуговування останніх у мережах високої напруги. Крім того, вимірювальні трансформатори використовуються для включення приладів релейного захисту.

Вимірювальний трансформатор напруги (ВТН) застосовується при вимірах у мережах змінного струму напругою понад 220 В. Трансформатор напруги являє собою понижуючий трансформатор (рис. 3.3.14, а) з таким відношенням витків у первинній і у вторинній обмотках, щоб при номінальній первинній напрузі вторинна напруга складала 100 В.

У вторинний ланцюг трансформатора напруги включаються вольтметри, частотоміри й обмотки напруги ватметрів, лічильників енергії і фазометрів. Оскільки електричний опір цих приладів великий (близько тисяч омів), то трансформатор напруги звичайно працює в режимі, близькому до режиму холостого ходу. Це дає можливість зневажити спаданням напруги в

обмотках і прийняти $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$, $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$, а тому що $E_1 = \frac{w_1}{w_2} E_2$ то напруга в

первинній обмотці

$$U_1 = \frac{w_1}{w_2} U_2 = K_U U_2,$$

тут K_U — коефіцієнт трансформації трансформатора напруги.

Вимірювальні трансформатори виготовляються однофазними і трифазними на первинну напругу від 380 до 400000 В. При напрузі до 3000

В трансформатори напруги виготовляють сухими. При напругах більше 3000 В трансформатори напруги виготовляють масляними, що необхідно для більшої електричної міцності ізоляції обмоток. З метою безпеки один з виводів вторинної обмотки і кожух трансформатора напруги заземлюються.

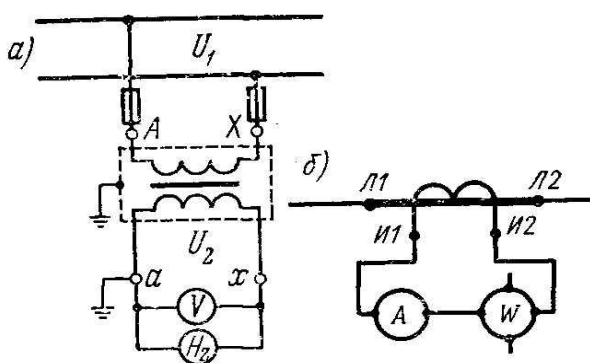


Рис. 3.3.14

включення амперметрів і обмоток струму ватметрів, лічильників енергії і фазометрів.

Первинна обмотка трансформатора струму виконується з проводу великого перерізу і включається в мережу послідовно (рис. 3.3.14, б).

Кількість витків в обмотках трансформатора вибирається такою, щоб при номінальному струмі в первинній обмотці струм у вторинному ланцюзі був 5 А.

Оскільки електричний опір приладів, що включаються у вторинний ланцюг, незначний, то режим роботи трансформатора струму близький до режиму короткого замикання, при якому магнітний потік у магнітопроводі настільки малий, що ним можна зневажити. Тоді, за аналогією з рівнянням струмів для досліду короткого замикання, можна записати наступну рівність для трансформатора струму:

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 = -\frac{w_2}{w_1} \dot{I}_2.$$

Звідси

$$\dot{I}_1 = K_c \dot{I}_2,$$

де K_c — коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

При включенні трансформатора струму в мережу заземлюються кожух і один вивід вторинної обмотки.

Якщо під час роботи трансформатора струму розімкнути його вторинну обмотку, то струм у ній буде дорівнювати нулю, а первинний струм залишиться колишнім. При цьому він буде цілком намагнічувати і викличе значне збільшення магнітного потоку. Магнітні втрати зростуть пропорційно квадрату потоку, що приведе до перегріву магнітопроводу, небезпечного для цілості ізоляції. У подальшому це може привести електричну лінію до короткого замикання на землю. Крім того, ЕРС вторинної обмотки зросте пропорційно магнітному потоку і досягне значень, небезпечних для обслуговуючого персоналу. Тому розмикання вторинного ланцюга трансформатора струму при наявності струму в первинній обмотці є неприпустимим. При необхідності відключити прилад потрібно затиски вторинної обмотки трансформатора струму попередньо замкнути накоротко.

Розв'язування задач до розділу 3.

Задача 3.1. Визначити діюче значення електрорушійної сили первинної обмотки трансформатора з кількістю витків $w_1 = 450$, якщо він підключений до джерела живлення з частотою $f = 50$ Гц, а магнітний потік в осерді $\Phi_m = 2,17 \cdot 10^{-3}$ Вб.

Розв'язування задачі 3.1

Діюче значення електрорушійної сили первинної обмотки визначається за виразом:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 450 \cdot 2,17 \cdot 10^{-3} = 316,8 \text{ В.}$$

Задача 3.2. Однофазний трансформатор з кількістю витків первинної та вторинної обмоток $w_1 = 450$, $w_2 = 250$ живиться від джерела з частотою $f = 50$ Гц та напругою $U_1 = 220$ В. Визначити амплітуду магнітного потоку в осерді трансформатора та електрорушійну силу вторинної обмотки.

Розв'язування задачі 3.2

Якщо нехтувати спадом напруги у первинній обмотці трансформатора, то електрорушійна сила первинної обмотки дорівнює напрузі джерела живлення

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m.$$

Тоді амплітуда магнітного потоку:

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44 f w_1} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 450} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{450}{250} = 1,8.$$

Електрорушійна сила вторинної обмотки трансформатора визначимо за виразом:

$$E_2 = \frac{E_1}{k} \approx \frac{U_1}{k} = \frac{220}{1,8} = 122,2 \text{ В.}$$

Задача 3.3 При неробочому режимі трансформатора напруга на його первинній обмотці $U_{10} = 500$ В, струм $I_{10} = 0,25$ А, потужність $P_{10} = 100$ Вт, напруга вторинної обмотки $U_{20} = 100$ В. Визначити коефіцієнт трансформації, коефіцієнт потужності неробочого режиму, активний та індуктивний опори вітки намагнічування трансформатора.

Розв'язування задачі 3.3

Коефіцієнт трансформації визначаємо відношенням напруг трансформатора. Оскільки $U_{10} \approx E_1 = 4,44 \cdot f w_1 \Phi_m$, $U_{20} \approx E_2 = 4,44 \cdot f w_2 \Phi_m$, то

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{500}{100} = 5.$$

Коефіцієнт потужності неробочого режиму дорівнює:

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}} = \frac{100}{500 \cdot 0,25} = 0,8.$$

Активний опір вітки намагнічування трансформатора для послідовної схеми заміщення обчислимо за виразом:

$$R_0 = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} = \frac{100}{0,25^2} = 1600 \text{ Ом.}$$

Повний опір вітки намагнічування:

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_{10}} = \frac{500}{0,25} = 2000 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір вітки намагнічування:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{2000^2 - 1600^2} = 1200 \text{ Ом.}$$

Задача 3.4. Трансформатор має такі паспортні дані: номінальна напруга $\frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{10 \text{ кВ}}{0,4 \text{ кВ}}$, напруга короткого замикання $U_{кз\%} = 5\%$, номінальний струм $I_{1m} = 2,5 \text{ А}$, потужність короткого замикання $P_{кз} = 600 \text{ Вт}$. Визначити активний та реактивний опори первинної та вторинної обмоток трансформатора.

Розв'язування задачі 3.4

Активний опір короткого замикання дорівнює:

$$R_{кз} = \frac{P_{кз}}{I_{1n}^2} = \frac{600}{2,5^2} = 96 \text{ Ом.}$$

Повний опір короткого замикання обчислюємо за виразом:

$$Z = \frac{U_{1кз}}{I_{1n}} = \frac{U_{кз\%} U_{1n}}{100 I_{1n}} = \frac{5 \cdot 10000}{100 \cdot 2,5} = 200 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір короткого замикання дорівнює:

$$X_{кз} = \sqrt{Z^2 - R_{кз}^2} = \sqrt{200^2 - 96^2} = 175 \text{ Ом.}$$

Активний опір первинної обмотки:

$$R_1 = \frac{R_{кз}}{2} = \frac{96}{2} = 48 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір первинної обмотки:

$$X_1 = \frac{X_{кз}}{2} = \frac{175}{2} = 87,5 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{10000}{400} = 25.$$

Активний та індуктивний опори вторинної обмотки визначаємо за виразами:

$$R_2 = \frac{R_1}{k^2} = \frac{48}{25^2} = 0,077 \text{ Ом;}$$

$$X_2 = \frac{X_1}{k^2} = \frac{87,5}{25^2} = 0,14 \text{ Ом.}$$

Задача 3.5. Напруженість магнітного поля в магнітопроводі з пік-трансформатора описується виразом:

$$H(t) = 725 \sin 2512t \text{ А/м.}$$

Визначити електрорушійну силу в обмотці $w = 1000$ витків, якщо площа поперечного перетину магнітопроводу $S = 0,9 \text{ см}^2$, а зв'язок між магнітною індукцією B та напруженістю H описується виразом:

$$B = 10^{-3} H(3 - 2 \cdot 10^{-6} H^2) \text{ Тл.}$$

Розв'язування задачі 5

Визначаємо магнітний потік в магнітопроводі

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= B(t)S = [3 \cdot 10^{-3} \cdot 725 \sin 2512t - 2 \cdot 10^{-9} (725 \sin 2512t)^3] \cdot 0,9 \cdot 10^{-4} = \\ &= 1,96 \cdot 10^{-4} \sin 2512t - 0,686 \cdot 10^{-4} \sin^3 2512t = \\ &= 1,96 \cdot 10^{-4} \sin 2512t - 0,686 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{4} [3 \sin 2512t - \sin(3 \cdot 2512t)] = \\ &= 10^{-4} (1,45 \sin 2512t + 0,171 \sin 7536t) \text{ Вб.} \end{aligned}$$

Електрорушійна сила

$$\begin{aligned} e(t) &= -w \frac{d\Phi(t)}{dt} = -1000 \cdot 10^{-4} (1,45 \cdot 2512 \cos 2512t + 0,171 \cdot 7536 \cos 7536t) = \\ &= -363 \cos 2512t - 129 \cos 7536t. \end{aligned}$$

Контрольні питання

1. Які основні компоненти трансформаторів?
2. Поясніть принцип роботи трансформатора.
3. За яких умов здійснюються режим холостого ходу і режим короткого замикання трансформаторів?
4. Які параметри трансформатора визначаються з досліду холостого ходу і короткого замикання?
5. Як визначається коефіцієнт трансформації?
6. Як поділяють втрати енергії в трансформаторі?
7. Яка умова найбільшого ККД трансформатора?
8. У чому полягає особливість трифазних трансформаторів?
9. Яка особливість автотрансформаторів?

Розділ 4

СИНХРОННІ МАШИНИ

4.1 ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА СИНХРОННИХ МАШИН

Синхронною називається безколекторна машина змінного струму, у якій швидкість обертання ротора n_1 знаходиться в строго постійному відношенні до частоти f_1 мережі змінного струму

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

де p — число пар полюсів машини.

Застосування синхронних машин дуже широке. Синхронна машина може працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна.

Синхронний генератор (СГ) є основним типом генератора змінного струму, що застосовується у процесі виробництва електроенергії.

Синхронні двигуни (СД) на відміну від двигунів інших типів мають строго постійну швидкість обертання при даній частоті, що не залежить від навантаження.

Іншою відмінною рисою синхронних двигунів є можливість регулювання їхнього коефіцієнта потужності. Остання властивість найбільш важлива в електроприводі великої потужності, тому що дає можливість підвищити коефіцієнт корисної дії. Синхронні двигуни малої потужності застосовуються в системах автоматики, де використовується головним чином їхня властивість постійної швидкості обертання.

Синхронні машини мають ще одне дуже важливе застосування — як синхронний компенсатор, що дає можливість поліпшувати коефіцієнт потужності в електричній системі.

Синхронні машини виготовляються різної потужності: від десятих вата (двигуни автоматичних систем) до сотень мегаватів (турбо- і гідрогенератори, синхронні компенсатори).

4.1.1 Принцип дії синхронних машин

Робота синхронного генератора заснована на явищі електромагнітної індукції і полягає в перетворенні механічної енергії в електричну енергію змінного струму.

При вивченні принципу дії генераторів постійного струму відзначалося, що в обмотці якоря цього генератора індукується змінна ЕРС, що за допомогою колектора і щіток перетворюється в постійну ЕРС. Отже, якщо генератор постійного струму позбавити колектора, то він перетвориться в генератор змінного струму. На рис. 4.1.1 зображена найпростіша модель однофазного генератора змінного струму, влаштована за принципом моделі генератора постійного

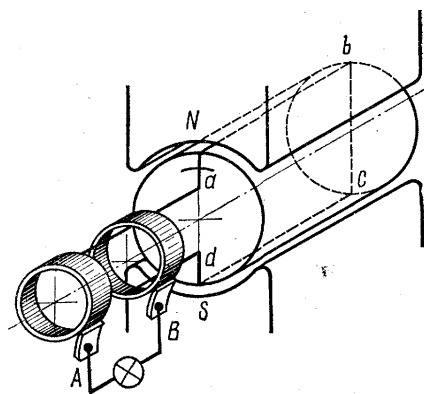


Рис. 4.1.1

струму, але, на відміну від останнього, не має колектора.

Обертюча частина генератора називається ротором, нерухома — статором. Щітки *A* і *B* накладені на контактні кільця, з'єднані з кінцями обмотки.

Якщо припустити, що магнітна індукція *B* розподіляється в повітряному зазорі синусоїдально ($B=B_m \sin \alpha$), то ЕРС, що індукується в якійсь обмотці генератора, також є синусоїдальною.

$$e = Blv = B_{\text{макс}} lv \sin \alpha.$$

Відсутність колектора спрощує конструкцію машини і дає можливість обмотку, в якій індукується ЕРС, розташувати на нерухомій частині генератора — на статорі 1 (рис. 4.1.2). При цьому обмотку збудження розташовують на роторі 2. Така конструктивна схема найбільш раціональна в синхронних машинах великої потужності, тому що при розташуванні робочої обмотки на роторі довелося б передавати в робочу обмотку через контактні кільця значні потужності при напрузі до 20 кВ. В цих умовах робота контактних кілець і щіток стала б дуже ненадійною, а втрати енергії в щітковому контакті — значні.

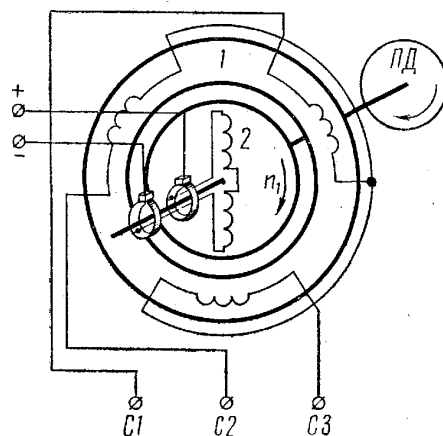


Рис. 4.1.2

При розташуванні робочої обмотки на статорі виводи цієї обмотки приєднуються безпосередньо до електричної мережі. Звичайно, і в цьому випадку машина не позбавляється від контактних кілець і щіток, необхідних для з'єднання обмотки збудження зі збудником. Але оскільки величина струму збудження в десятки разів менше робочого (змінного) струму, а напруга не перевищує 450 В, то щітковий контакт працює більш надійно, а втрати енергії в ньому невеликі.

Виходячи з перерахованих розумінь синхронні машини, як правило, виконують з робочою обмоткою, розташовуваною на статорі.

Обмотка статора трифазного синхронного генератора складається з трьох однофазних обмоток, розміщених у просторі під кутом 120 ел. градусів відносно один одного (рис. 4.1.2) і з'єднаних зіркою чи трикутником. На роторі розташована обмотка збудження, при підключенні якої до джерела постійного струму (збудника) виникає магнітне поле збудження. За допомогою первинного двигуна ротор генератора приводять в обертання зі швидкістю n_1 . При цьому магнітне поле ротора також обертається та індукує в трифазній обмотці статора ЕРС E_A, E_B, E_C , що, будучи однаковими по величині і зрушеними по фазі відносно один одного на $1/3$ періоду (120 ел. градусів), утворюють трифазну симетричну систему ЕРС.

Більшість синхронних генераторів проектується на промислову частоту 50 Гц. Для одержання ЕРС такої частоти необхідна швидкість обертання ротора

$$n = \frac{50 \cdot 60}{p} = \frac{3000}{p}$$

В табл. 4.1 приведені синхронні швидкості для ряду значень p при частоті мережі $f_1=50$ Гц.

Таблиця 4.1

Значення синхронної швидкості

p	1	2	3	4	5	6
n_1 (об/хв)	3000	1500	1000	750	600	500

4.1.2. Збудження синхронних машин

У синхронних машинах застосовуються два способи збудження: електромагнітне і збудження постійними магнітами.

При електромагнітному збудженні основний магнітний потік створюється за допомогою обмотки збудження.

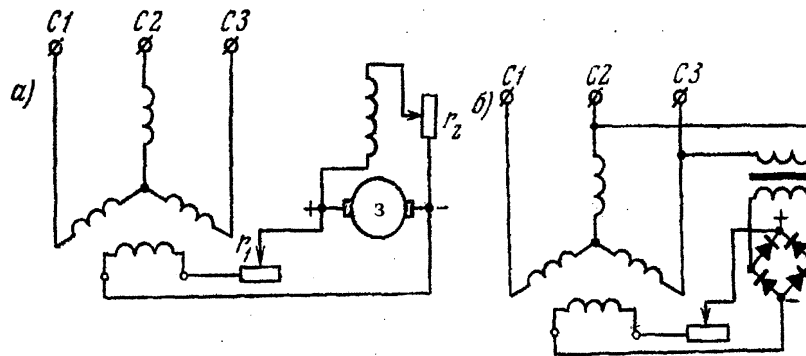


Рис. 4.1.3.

Залежно від способу живлення обмотки збудження постійним струмом синхронні машини розділяються на машини незалежного збудження і машини із самозбудженням. При незалежному збудженні для живлення обмотки збудження використовується генератор постійного струму, названий збудником (рис. 4.1.3, а). Реостати r_1 і r_2 призначені для регулювання величини струму збудження синхронної машини. Потужність збудника складає від 2 до 5% потужності синхронної машини при напрузі до 450 В. Збудника звичайно монтують разом із синхронною машиною і він є її невід'ємною частиною.

При цьому збудника розташовують або по осі машини, тоді якор збудника закріплюють на виступаючому кінці вала, або його встановлюють на корпусі машини і тоді обертання якоря збудника здійснюють від вала синхронної машини за допомогою пасової передачі (рис.4.1.4).

При самозбудженні живлення обмотки збудження здійснюється від синхронного

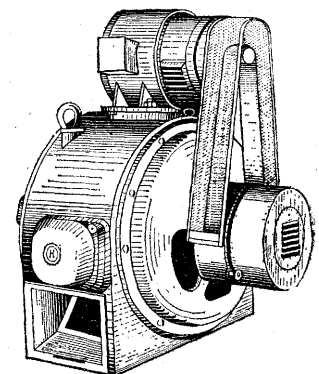


Рис.4.1.4

генератора з застосуванням випрямляча (рис. 4.1.3, б). Самозбудження застосовується в синхронних машинах малої і середньої потужності.

При збудженні синхронних машин *постійними магнітами* останні звичайно розташовуються на роторі. Цей спосіб збудження дає можливість одержати машину без контактних кілець. Відсутність у такій машині обмотки збудження зменшує електричні втрати, а отже, підвищує ККД. Але разом з тим збудження від постійних магнітів ускладнює регулювання параметрів машини, наприклад, регулювання ЕРС генератора.

Синхронні машини з постійними магнітами звичайно виконуються на малі потужності.

4.1.3 Типи синхронних машин та їх будова

В силових установках змінного струму як первинні двигуни синхронних генераторів застосовують парові чи гідравлічні турбіни і двигуни внутрішнього згорання (дизелі). В першому випадку синхронні генератори називають гідрогенераторами і турбогенераторами, а в другому випадку — дизель-генераторами. Усі ці типи синхронних генераторів конструктивно відрізняються один від одного.

Оскільки гідравлічна турбіна працює при порівняно невеликій швидкості обертання (60—500 об/хв), то для одержання змінного струму промислової частоти в гідрогенераторі застосовують ротор з великим числом полюсів. Тому ротори гідрогенераторів мають конструкцію з *явно вираженими полюсами* (явнополюсну), при якій кожен полюс виконується у виді окремого вузла, що складається із осердя і полюсної котушки. Усі полюси закріплюються на ободі (рис. 4.1.5, а).

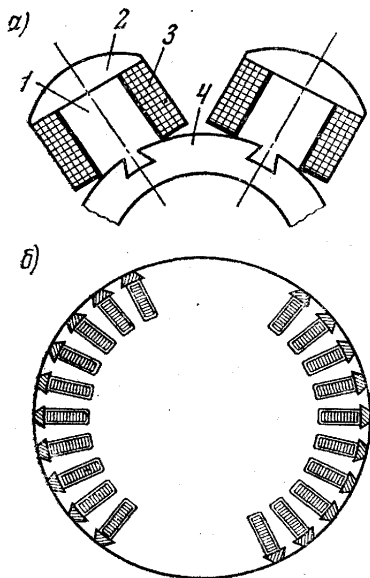


Рис. 4.1.5

Гідрогенератори, як правило, виконуються з вертикальним розташуванням вала (див. рис. 4.1.6).

Парова турбіна працює при великій швидкості обертання, тому турбогенератори є швидкохідними синхронними машинами і їхні ротори, як правило, виконуються двополюсними ($n_1=3000$ об/хв).

У процесі роботи машини на ротор діють відцентрові сили, величина яких пропорційна квадрату колової швидкості. Тому при таких великих швидкостях обертання, які мають місце в турбогенераторах, явнополюсна конструкція ротора непридатна за умовами механічної міцності. В цьому випадку застосовують *неявнополюсний* ротор, що має вид подовженого сталевого циліндра з фрезерованими на поверхні подовжніми пазами для обмотки збудження (рис. 4.1.5, б).

Турбогенератори (рис. 4.1.7) і дизель-генератори виконуються з горизонтальним розташуванням вала. Дизель-генератори розраховуються на швидкість обертання 600—1500 об/хв і виконуються з явнополюсним ротором (див. рис. 4.1.8).

Нижче приводиться опис конструкції основних частин синхронних машин.

Статор є нерухомою частиною синхронної машини і складається з корпусу і осердя, в пазах якого розташовується обмотка (рис. 4.1.8).

Для машин малої потужності корпуси відливають з чавуну чи сталі, а для машин середньої і великої потужності – виконують зварними. Корпуси машин великої потужності для зручності зборки і транспортування роблять рознімними.

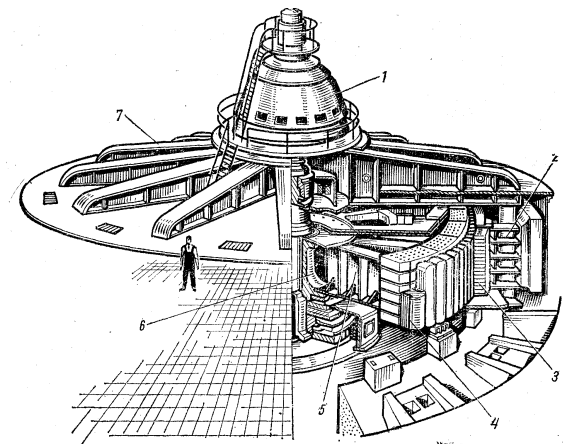


Рис. 4.1.6

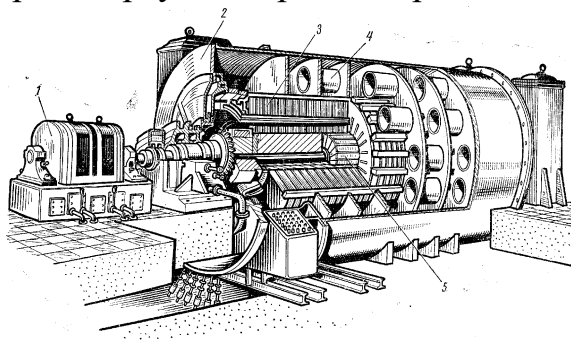


Рис. 4.1.7

Осердя статора виготовляють з листової електротехнічної сталі товщиною 0,5 чи 0,35 мм. Листи штампують у виді кілець та ізолюють із двох сторін лаком. У великих машинах осердя розділяють в осьовому напрямку на ряд пакетів товщиною до 6 см, між якими залишають повітряний зазор (вентиляційний канал) шириною до 1

см.

В листах осердя виготовляють пази для укладання проводів обмотки статора. Найчастіше пази виконують прямокутними, відкритими чи напіввідкритими.

Обмотку статора виконують із секцій, виготовлених звичайно з мідних проводів круглого чи прямокутного перерізу.

Виводи обмотки статора позначають буквою *С* з цифрою, відповідно до номера фази.

Ротор неявнополюсних машин (див. рис. 4.1.7) виконують з цільного пакування чи збірним. Для розміщення обмотки збудження на зовнішній поверхні ротора фрезують пази прямокутної форми, що займають тільки дві третини кола, утворюючи центральні зубці (див. рис 4.1.5, б). Обмотку ротора неявнополюсних машин виконують з мідного проводу прямокутного перетину. Обмотка кріпиться за допомогою металевих клинів, що

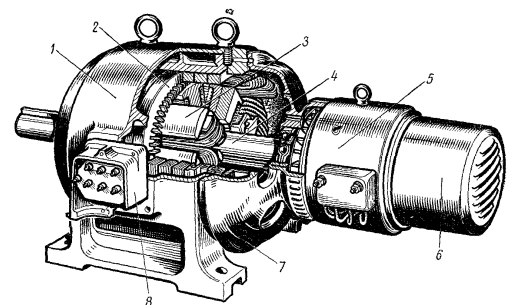


Рис. 4.1.8

закладаються в пази. Ізоляція обмотки ротора здійснюється так само, як обмотки статора. Кінці обмотки виводяться на контактні кільця. Ротор з явно вираженими полюсами (рис. 4.1.5, а) складається з обода, на якому закріплені осердя полюсів з котушками. Осердя полюса має з одного боку полюсний наконечник, а з іншого боку – хвіст, за допомогою якого він кріпиться на ободі.

4.2 ОБМОТКИ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

Обмотка статора машини змінного струму являє собою систему проводів, певним чином покладених у пазах осердя статора. Обмотки статора машин змінного струму мають багато спільного з обмотками якоря машин постійного струму.

Але між ними є й істотна різниця — обмотки змінного струму є *незамкнутими*.

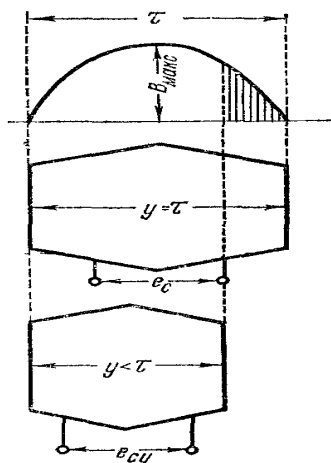


Рис. 4.2.1

Елементом обмотки статора є *секція*, що може бути одно- чи багатовитковою. Секція складається з активних сторін і лобових частин. Відстань між активними сторонами секції називається кроком обмотки y .

Крок називається *діаметральним* чи *повним*, якщо він дорівнює полюсному розподілу і *скороченим*, якщо він менше полюсного розподілу (рис. 4.2.1). Обмотки статора класифікуються в такий спосіб:

- 1) по числу фаз — *однофазні* і *багатофазні* (головним чином трифазні);
- 2) за способом укладання секцій у пази — *одношарові*, коли сторона секції займає весь паз, і *двошарові*, коли в одному пази лежать дві сторони різних секцій (за аналогією з обмоткою якоря машини постійного струму);
- 3) залежно від розмірів секцій — обмотки з повним і скороченим кроком.

4.2.1 Виконання обмоток статора

Трифазна двошарова обмотка

Найпростіша трифазна обмотка може бути виконана трьома секціями, осі яких зсунуті за колом статора на $1/3$ подвійного полюсного розподілу. Кожна секція в цьому випадку являє собою фазну обмотку (рис. 4.2.2). Звичайно фазна обмотка складається не з однієї, а з декількох секцій, що займають q пазів у межах кожного полюсного розподілу. Таким чином, для утворення трифазної обмотки зубчастий шар осердя статора в межах кожного полюсного розподілу необхідно розділити на три

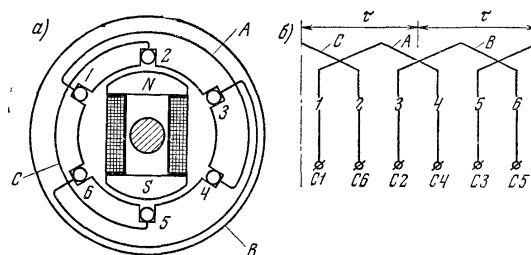


Рис. 4.2.2

зони по q пазів у кожній. Порядок чергування таких зон під кожним полюсом повинний бути однаковим. Секції, покладені в пази однакових зон, утворюють фазні обмотки.

Для визначення величини q , що являє собою *число пазів, які приходяться на полюс і фазу*, варто користуватися формулою

$$q = \frac{Z}{2pt},$$

де t — число фаз; для трифазної обмотки $t=3$.

Кут зсуву між осями фазних обмоток у трифазній обмотці складає 120 ел. градусів. Однак для побудови схеми обмотки зручніше це зрушення виразити в пазах. Все коло статора складає $360p$ ел. градусів, тому кут між сусідніми пазами

$$\alpha = \frac{360p}{Z}.$$

Тоді зсув між фазними обмотками, виражений у пазах, дорівнює

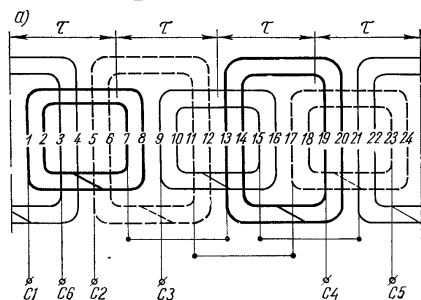
$$\lambda = \frac{120}{\alpha}.$$

Двошарові обмотки мають переважне поширення в машинах змінного струму, що пояснюється рядом переваг двошарових обмоток, з яких головним є можливість будь-якого скорочення кроку обмотки, що дає, у свою чергу, можливість максимально наблизити форму кривої ЕРС до синусоїди.

Але поряд з цим двошарові обмотки не позбавлені недоліків, до яких насамперед варто віднести деякі складності при укладанні секцій обмотки, труднощі ремонту обмотки під час пошкодження ізоляції нижнього шару, а також неможливість виконати роз'ємний статор без порушення обмотки в місцях рознімання.

Трифазні одношарові обмотки статорів

В одношарових обмотках кожна сторона секції цілком заповнює паз сердечника статора. Одношарові обмотки статорів розділяються на концентричні і шаблонні.



У *концентричній* обмотці секції кожної секційної групи мають різну ширину і розташовуються концентрично.

Кроки обмотки у секцій, що входять у секційну групу, неоднакові, але їх середнє значення визначається виразом

$$y_{cp} = \frac{Z}{2p}.$$

Рис. 4.2.3

Розгорнута схема цієї обмотки представлена на рис. 4.2.3, а. Розглянута одношарова обмотка називається *двоплощинною*, тому що лобові частини секцій цієї обмотки мають різний виліт і розташовуються в двох площинах (рис. 4.2.3, б). Така конструкція обмотки дозволяє уникнути перетинання лобових частин секції, що належать різним фазам. При непарному числі пар полюсів число груп лобових частин буде так само непарним. У цьому випадку одну секційну групу приходится робити перехідного розміру з двояко вигнутою лобовою частиною.

Істотним недоліком концентричних обмоток є наявність у них секцій різних розмірів, що ускладнює виготовлення обмотки. Цього недоліку позбавлені *шаблонові* одношарові обмотки. Усі секції цих обмоток мають однакові розміри і можуть виготовлятися на загальному шаблоні. Крім того, усі секції таких обмоток мають однакові опори, а лобові частини виходять коротші, ніж у концентричних обмотках, що зменшує витрату міді.

Як приклад розглянемо просту шаблову обмотку двополусної машини з трьома секціями в секційній групі. Розгорнута схема цієї обмотки представлена на рис. 4.2.4. Трапецеїдальна форма секцій трохи полегшує розташування лобових частин обмотки.

Загальним недоліком усіх типів одношарових обмоток є труднощі з розміщенням лобових частин, які приходится розміщувати в двох і більше площинах.

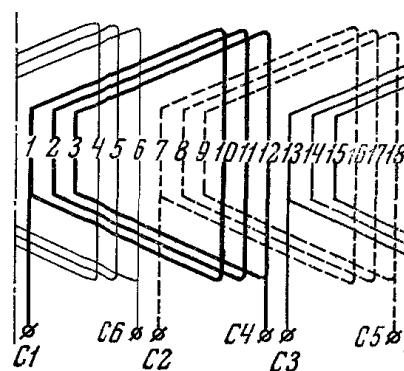


Рис. 4.2.4

Однофазні обмотки

Однофазна обмотка виконується аналогічно одній фазі трифазної обмотки з тією різницею, що секції цієї обмотки займають лише 2/3 пазів сердечника статора. Така конструкція обмотки робить її найбільш економічною.

Річ у тому, що заповнення 1/3 пазів статора, які залишилися, призвело б до збільшення витрати міді на виготовлення обмотки в 1,5 раза, у той час як ЕРС обмотки збільшилася б усього лише в 1,15 разів. На рис. 4.2.5 приведена розгорнута схема однофазної концентричної обмотки. Однофазні обмотки можуть бути також і двошаровими.

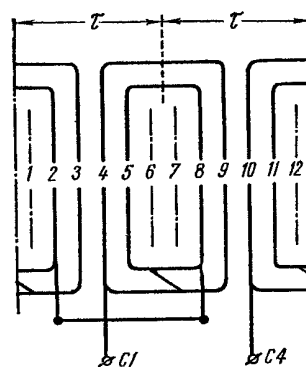


Рис. 4.2.5

4.2.2. Електрорушійна сила фазної обмотки статора

Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі синхронної машини

Як впливає із закону електромагнітної індукції, миттєве значення ЕРС одного провідника статорної обмотки визначається виразом

$$e = Blv.$$

Якщо прийняти довжину провідника l і швидкість руху поля ротора v величинами постійними, що і має місце в синхронній машині, то характер зміни ЕРС e_{np} буде залежати винятково від кривої розподілу магнітної індукції B в зазорі по окружності статора

$$e_{np} = B \cdot const.$$

З цього випливає, що для отримання кривої ЕРС, близької до синусоїди, насамперед необхідно, щоб розподіл магнітної індукції B в зазорі було синусоїдальним. У явнополюсних машинах це досягається збільшенням зазору під краями полюсних наконечників (рис. 4.2.6). Гарні результати дає полюсний наконечник з відношенням $\delta_1 / \delta = 1,5 - 2$.

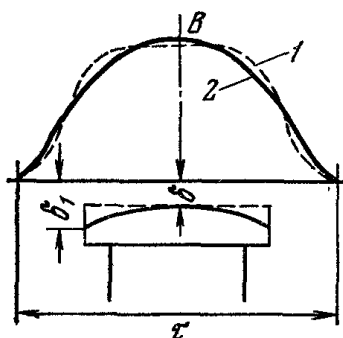


Рис. 4.2.6

У неявнополюсних машинах синусоїдальний характер розподілу магнітної індукції створюється підбором відповідного відношення між частиною окружності ротора без пазів і частиною його окружності з пазами, в які укладається розподілена обмотка збудження (див. рис. 4.1.5, б). Звичайно це відношення дорівнює $2/3$.

Електрорушійна сила фазної обмотки статора

ЕРС фазної обмотки E_1 являє собою суму ЕРС усіх секцій, що складають фазну обмотку.

Як уже відзначалося, фазна обмотка складається із секційних груп, кожна з яких складається, у свою чергу, з q секцій, розташованих під однією парою полюсів. З цього випливає, що всі групи складаються з однакового числа секцій, що знаходяться в однакових магнітних умовах. Тому при послідовному з'єднанні секційних груп у фазній обмотці її ЕРС дорівнює

$$E_1 = E_r 2p,$$

де E_r — ЕРС однієї секційної групи.

У процесі роботи синхронної машини обертове поле ротора рухається відносно будь-якого активного провідника обмотки статора з лінійною швидкістю

$$v = \frac{\pi D n_1}{60} = \frac{\tau 2 p n_1}{60} = 2\tau f_1,$$

де D — діаметр розточення статора; τ — полюсний розподіл, що дорівнює $\tau = \pi D / 2p$.

При цьому в провіднику обмотки статора наводиться ЕРС, максимальне значення якої

$$E_{np.макс} = B_{макс} l v = B_{макс} l 2\tau f_1,$$

де $B_{макс}$ — максимальне значення магнітної індукції в зазорі.

Якщо прийняти розподіл магнітної індукції в зазорі синусоїдальним, то середнє значення магнітної індукції

$$B_{cp} = \frac{2}{\pi} B_{макс}.$$

Замінивши максимальне значення індукції середнім, отримаємо вираз максимального значення ЕРС провідника

$$E_{np.макс} = \frac{B_{cp}}{2/\pi} l 2\tau f_1 = \pi \Phi f_1,$$

де $\Phi = B_{cp} l \tau$ — основний магнітний потік ротора.

Переходячи до діючого значення, отримаємо

$$E_{np} = \frac{E_{np.макс}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_1.$$

Для секції обмотки з діаметральним кроком ($y=\tau$) і числом витків w_s отримаємо вираз діючого значення ЕРС

$$E_c = 2E_{np} w_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_1 w_s,$$

чи

$$E_c = 4,44 \Phi f_1 w_s.$$

Якщо ж секція виконана із скороченим кроком, то у формулу варто ввести коефіцієнт скорочення K_{y1} , що враховує зменшення ЕРС першої гармоніки при скороченні кроку секції

$$E_{cy} = 4,44 \Phi f_1 w_s K_{y1}.$$

Для визначення ЕРС всієї обмотки необхідно ЕРС однієї секції E_{cy} помножити на число послідовно з'єднаних секцій. При послідовному з'єднанні секційних груп число послідовно з'єднаних секцій у фазній обмотці дорівнює $2pq$. Отже, ЕРС фазної обмотки

$$E_1 = E_{cy} 2pq K_{p1} = 4,44 f_1 \Phi w_s 2pq K_{y1} K_{p1}.$$

Позначимо $w_s 2pq$ через w_1 (число послідовно з'єднаних витків у фазній обмотці), а $K_{y1} K_{p1}$ — через K_1 (обмотковий коефіцієнт обмотки для першої гармоніки). Тоді формула ЕРС фазної обмотки матиме вигляд

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 K_1.$$

4.2.3 Реакція якоря синхронного генератора

Магнітне поле обмотки статора

При симетричному навантаженні трифазного генератора струми в його фазних обмотках однакові по величині і зрушені по фазі відносно один одного на 120 ел. градусів. Струм кожної фазної обмотки створює НС. Сукупна дія НС трьох фазних струмів створює результуючу НС трифазної обмотки, вектор якої обертається щодо статора в ту саму сторону і з такою самою швидкістю, що і ротор синхронної машини.

Принцип утворення цієї обертової НС розглянемо на найпростіший трифазній обмотці, кожна фаза якої складається з одного витка (рис. 4.2.7, а). Обмотка ця є двополусною, оскільки сторони витка кожної фази розташовані по діаметру статора. Фазові обмотки з'єднані зіркою.

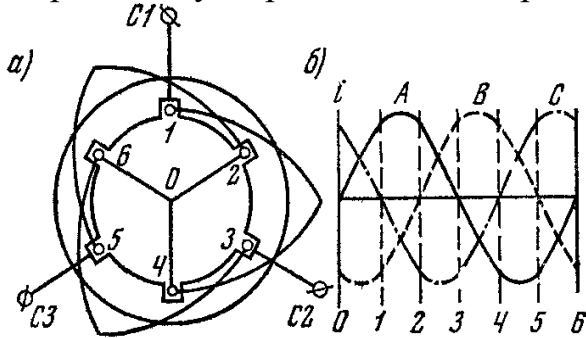


Рис. 4.2.7

Припустимо, що НС обмотки, збудження дорівнює нулю, а струм в обмотці статора створюється за

рахунок ЕРС стороннього джерела енергії трифазного струму. Зміна струму у фазних обмотках показано графічно у виді трьох синусоїд, зрушених по фазі відносно один одного на 120 ел. градусів (рис. 4.2.7, б).

Розглянемо зміни магнітного потоку, створюваного НС трифазної обмотки на протязі одного періоду. З цією метою наведемо ряд побудов вектора магнітного потоку статорної обмотки, що відповідає різним моментам часу.

У положенні 0 (рис. 4.2.7, б) струм у фазі А дорівнює нулю, у фазі В має негативний напрямок, а у фазі С — позитивне. Зазначені напрямки струму відзначаємо на рис. 4.2.8, а.

Далі визначаємо напрямок магнітного потоку усередині статора (потік спрямований вертикально вниз). У положенні 1 (рис. 4.2.7, б) струм у фазі С дорівнює нулю, у фазі А — має позитивний напрямок, а у фазі В — залишився негативним.

Зробивши побудови, як і для положення 0, бачимо, що магнітне поле усередині статора в порівнянні з положенням 0 повернулося на 60° ($1/3\tau$) у напрямку руху годинної стрілки (рис. 4.2.8, б).

Зробивши аналогічні побудови для положень 2, 3, 4, 5 і 6 (рис. 4.2.7, б), бачимо, що магнітний потік усередині статора щоразу під час переходу від

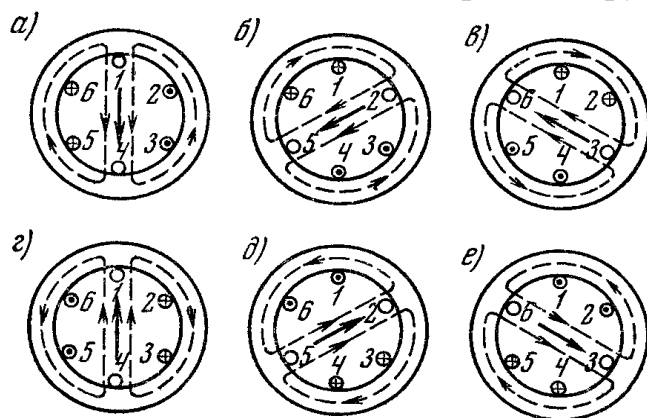


Рис. 4.2.8

одного положення до наступного повертається на 60° і за один період змінного струму робить один оберт (рис. 4.2.8, в, г, д, е). Якщо частота струму в обмотці статора $f_1=50$ Гц, то магнітне поле статора обертається зі швидкістю 50 об/с. У загальному випадку швидкість обертального поля статора $n_{ст}$ прямо пропорційна частоті струму і обернено пропорційна числу пар полюсів обмотки статора

$$n_{cm} = \frac{f_1 60}{p}.$$

Цей вираз показує, що НС обмотки статора обертається з тією самою швидкістю, що і ротор машини ($n_{ст}=n_1$). З цього випливає, що НС обмотки статора і НС обмотки збудження нерухомі один щодо одного.

На рис. 4.2.9 зображена картина магнітного поля створеного НС обмотки статора, де видно, що НС обмотки статора створює два магнітних потоки: потік якоря Φ_a , що проходить по сердечнику статора і замикається через сердечник ротора, і потік розсіювання $\Phi_{р1}$, який охоплює провідники обмотки статора і замикається в повітряному зазорі машини, не проникаючи в сердечник ротора.

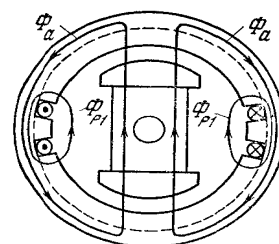


Рис. 4.2.9

Реакція якоря

У процесі роботи навантаженого синхронного генератора в ньому діють дві НС:

а) НС обмотки збудження

$$F_0 = i_3 \frac{w_3}{2p},$$

де $\frac{w_3}{2p}$ — число витків у полюсній котушці збудження; i_3 — струм в обмотці збудження;

б) НС обмотки статора (якоря)

$$F_a = 0,45m_1 \frac{I_1 w_1}{p} K_1,$$

де m_1 — число фаз обмотки; K_1 - обмотковий коефіцієнт.

НС обмотки збудження F_0 створює магнітне поле збудження. Але при підключенні навантаження НС F_0 і F_a взаємодіють і створюють результуюче магнітне поле, що відрізняється від поля обмотки збудження. Цей процес впливу НС обмотки статора F_a на НС обмотки збудження F_0 називається *реакцією якоря*.

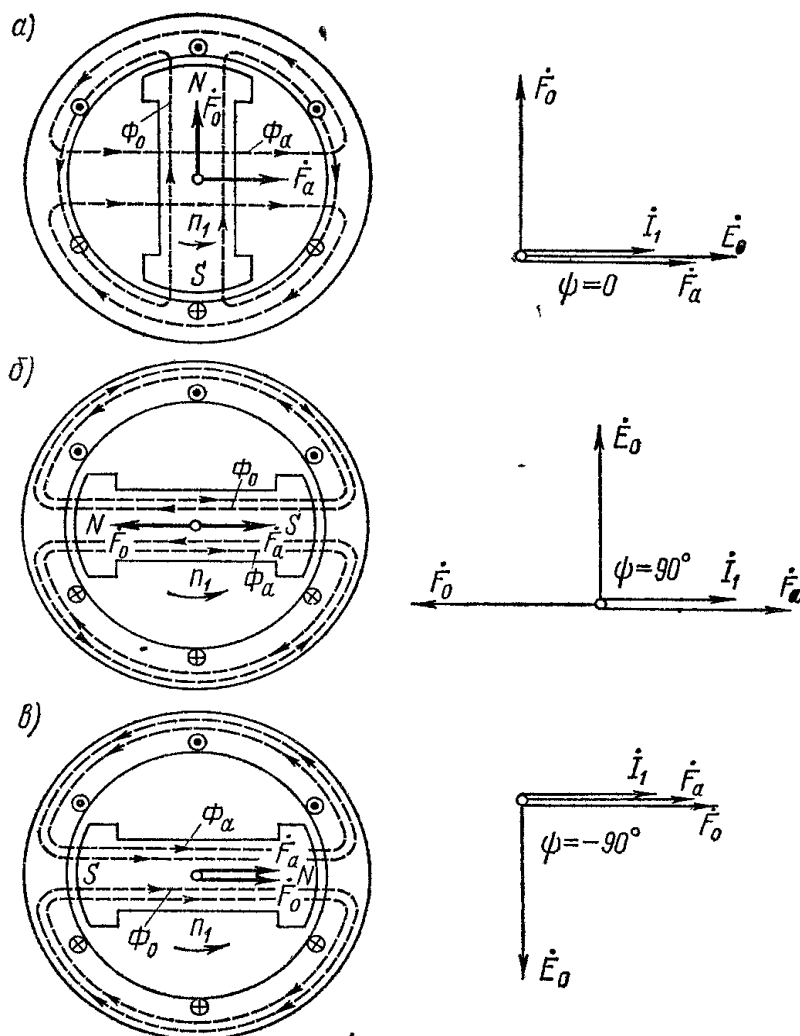
Реакція якоря впливає на робочі властивості синхронної машини, тому що зміна магнітного поля в машині супроводжується зміною ЕРС, наведеної в обмотці статора, а отже, зміною і ряду інших величин, зв'язаних

з цією ЕРС. У принципі реакція якоря синхронних машин аналогічна реакції якоря в машинах постійного струму.

Однак, якщо в машинах постійного струму вплив реакції якоря на робочі властивості машини залежить винятково від величини навантаження, то в синхронних машинах цей вплив визначається ще і характером навантаження. Синхронні генератори, як правило, працюють на змішане навантаження (активно-індуктивне чи активно-ємнісне). Але для з'ясування питання про вплив реакції якоря на роботу синхронної машини доцільно розглянути випадки роботи генератора при навантаженнях граничного характеру, а саме: активного, індуктивного і ємнісного. Скористаємося для цього векторними діаграмами НС. При побудові цих діаграм варто мати на увазі, що вектор ЕРС \dot{E}_o , індукованою магнітним потоком обмотки збудження в обмотці статора, відстає по фазі від вектора цього потоку (а отже, і вектора НС \dot{F}_o) на 90° .

Що ж стосується вектора струму в обмотці статора \dot{I}_1 , то він може займати стосовно вектора \dot{E}_o різні положення, обумовлені кутом ψ , залежно від виду навантаження.

Активне навантаження ($\psi = 0$). На рис. 4.2.10, а представлений статор і ротор двополюсного генератора. На статорі показана частина фазної



обмотки. Ротор явнополюсний, обертається проти руху годинникової стрілки. У розглянутий момент часу ротор займає вертикальне положення, що відповідає максимуму ЕРС E_0 у фазній обмотці. Тому що струм при активному навантаженні збігається по фазі з ЕРС, то зазначене положення ротора відповідає також і максимуму струму. Побудувавши лінії магнітної індукції поля збудження (ротора) і лінії магнітної індукції поля обмотки статора, бачимо, що НС обмотки статора F_a спрямована перпендикулярно НС збудження F_0 .

Цей висновок також підтверджується векторною діаграмою, побудованою для цього ж випадку. Порядок побудови цієї діаграми наступний: відповідно до положення ротора генератора проводимо вектор НС збудження \dot{F}_0 ; під кутом 90° до цього вектора в бік відставання проводимо вектор ЕРС \dot{E}_0 , наведеної магнітним полем збудження в обмотці статора; при підключенні чисто активного навантаження струм в обмотці статора \dot{I}_1 збігається по фазі з ЕРС \dot{E}_0 , а тому вектор НС \dot{F}_a , створеної цим струмом, зрушений у просторі щодо вектора \dot{F}_0 на 90° .

Така взаємодія НС F_a і F_0 аналогічна реакції якоря в генераторі постійного струму при розташуванні щіток на геометричній нейтралі: магнітне поле машини послаблюється під краєм полюса, що набігає, і підсилюється під краєм полюса, що збігає. Внаслідок насичення магнітного ланцюга результуюче магнітне поле машини трохи послаблюється.

Індуктивне навантаження ($\psi = 90^\circ$). При чисто індуктивному навантаженні генератора струм статора \dot{I}_1 відстає по фазі від ЕРС \dot{E}_0 на 90° . Тому він досягає максимального значення лише після повороту ротора вперед на 90° щодо його положення, що відповідає максимуму ЕРС E_0 (див. рис. 4.2.10, б). При цьому НС якоря \dot{F}_a діє по осі полюсів ротора зустрічно НС збудження \dot{F}_0 . У цьому ми переконуємось також, побудувавши векторну діаграму. Така дія НС якоря F_a послабляє поле машини. Тобто, реакція якоря в синхронному генераторі при чисто індуктивному навантаженні має подовжньо - розмагнічувальну дію.

Ємнісне навантаження ($\psi = -90^\circ$). Тому що струм \dot{I}_1 при ємнісному навантаженні випереджає по фазі ЕРС \dot{E}_0 на 90° , то свого найбільшого значення він досягає раніше, ніж ЕРС, тобто коли ротор займе положення, показане на рис. 4.2.10, в. НС якоря \dot{F}_a , так само як і в попередньому випадку, діє по осі полюсів, але тепер уже згідно з НС збудження \dot{F}_0 . При цьому відбувається посилення магнітного поля збудження. Таким чином, при чисто ємнісному навантаженні синхронного генератора реакція якоря має подовжньо - намагнічувальну дію.

Змішане навантаження. При змішаному навантаженні синхронного генератора струм статора \dot{I}_1 зрушений по фазі відносно ЕРС \dot{E}_0 на кут ψ , значення якого знаходяться в межах $0 < \psi < 90^\circ$. Для з'ясування питання про

вплив реакції якоря при змішаному навантаженні скористаємося діаграмами НС, що зображені на рис. 4.2.11.

При активно-індуктивному навантаженні (рис. 4.2.11, а) вектор \dot{F}_a відстає від вектора \dot{E}_o на кут $0 < \psi < 90^\circ$. Розкладемо вектор \dot{F}_a на дві складові: подовжню складову НС якоря $F_{ad} = F_a \sin \psi$ і поперечну складову НС якоря $F_{aq} = F_a \cos \psi$.

Таке ж розкладання НС якоря \dot{F}_a на складові можна зробити у випадку активно-ємнісного навантаження (рис. 4.2.11, б). Поперечна складова НС якоря F_{aq} пропорційна активній складовій струму навантаження $I_q = I_1 \cos \psi$, а

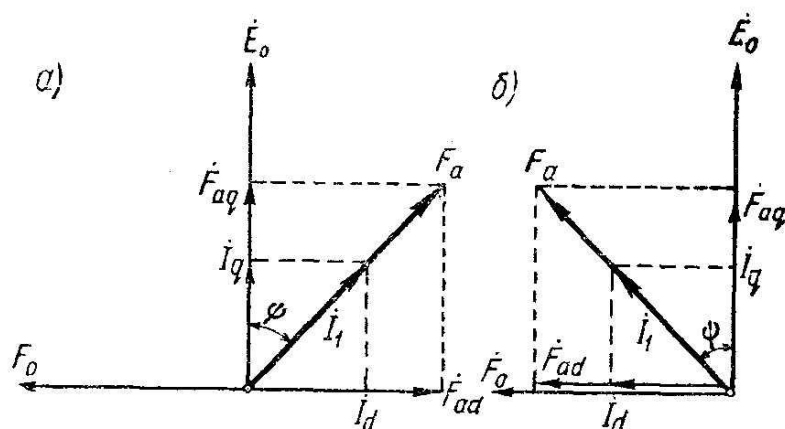


Рис. 4.2.11

подовжня складова НС якоря F_{ad} пропорційна реактивній складовій струму навантаження $I_d = I_1 \sin \psi$.

При цьому, якщо реактивна складова струму навантаження \dot{I}_d відстає по фазі від ЕРС \dot{E}_o (навантаження активно-індуктивне), то НС \dot{F}_{ad} розмагнічує генератор, якщо ж реактивна складова \dot{I}_d випереджає по фазі ЕРС \dot{E}_o (навантаження активно-ємнісне), то НС \dot{F}_{ad} підмагнічує генератор.

Напрямок вектора \dot{F}_{ad} щодо вектора \dot{F}_o визначає характер реакції якоря, що при струмі навантаження \dot{I}_1 , який відстає по фазі від ЕРС \dot{E}_o , є розмагнічувальним, а при струмі \dot{I}_1 , що випереджає по фазі ЕРС \dot{E}_o , є підмагнічувальним.

У явнополосній машині магнітний опір у міжполюсному просторі більше магнітного опору під полюсами. Тому складова магнітного потоку якоря по поперечній осі в явнополосній машині набагато менша, ніж у неявнополосної

$$F_{aq} = K_q F_a \cos \psi.$$

Тут K_q — коефіцієнт поперечної реакції якоря, що являє собою відношення магнітного потоку якоря по поперечній осі в явнополосній

машині до складової потоку якоря по цій же осі в неявнополісній машині. Звичайно $K_q=0,3—0,5$.

Подовжня складова НС якоря в явнополісній машині

$$F_{ad} = K_d F_a \sin \psi,$$

де K_d — коефіцієнт подовжньої реакції якоря, що враховує деяке ослаблення складової магнітного потоку якоря по подовжній осі в явнополісній машині внаслідок нерівномірності повітряного зазору. Звичайно $K_d = 0,8—0,95$.

Рівняння електрорушійних сил синхронного генератора

Напруга на виводах генератора, що працює з навантаженням, відрізняється від напруги цього генератора в режимі холостого ходу. Це визначається впливом ряду причин: реакції якоря, магнітного потоку розсіювання, спаданням напруги в активному опорі обмотки статора.

Як було встановлено, при роботі навантаженої синхронної машини в ній діє кілька НС, що, взаємодіючи, створюють результуючий магнітний потік. Однак при врахуванні факторів, що впливають на напругу синхронного генератора, умовно виходять із припущення незалежної дії всіх НС генератора, тобто передбачається, що кожна із НС створює власний магнітний потік.

Але слід зазначити, що таке уявлення не відповідає фізичній сутності явищ, тому що в одній магнітній системі виникає лише один магнітний потік — результуючий. Але в даному випадку припущення незалежності магнітних потоків дає можливість зрозуміти вплив усіх факторів на роботу синхронної машини.

Отже, з'ясуємо, як впливають НС, що діють у явнополісному синхронному генераторі, на роботу останнього.

1. НС обмотки збудження F_0 створює магнітний потік збудження Φ_0 , що індукуює в обмотці статора основну ЕРС генератора E_0 .

2. Складова НС обмотки статора по подовжній осі F_{ad} створює складову магнітного потоку реакції якоря за подовжньою віссю Φ_{ad} . Цей магнітний потік індукуює в обмотці статора ЕРС E_{ad} , яка називається ЕРС реакції якоря за подовжньою віссю

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d x_{ad},$$

де x_{ad} — індуктивний опір обмотки статора, еквівалентний реакції якоря за подовжньою віссю.

Величина x_{ad} показує, який ступінь впливу реакції якоря за подовжньою віссю на роботу генератора.

Так, у синхронних машинах при насиченій магнітній системі магнітний потік реакції якоря за подовжньою віссю Φ_{ad} менше, ніж при ненасиченій. Визначається це тим, що потік Φ_{ad} майже цілком проходить через сталь, магнітний опір якої зростає при магнітному насиченні. З

цього впливає, що величина x_{ad} залежить від ступеня магнітного насичення машини: зі збільшенням ступеня магнітного насичення x_{ad} зменшується.

3. Складова НС обмотки статора за поперечною віссю F_{aq} створює складову магнітного потоку реакції якоря за поперечною віссю Φ_{aq} , який індукує в обмотці статора ЕРС реакції якоря за поперечною віссю

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q x_{aq},$$

де x_{aq} —індуктивний опір обмотки статора, еквівалентний реакції якоря за поперечною віссю.

Величина x_{aq} не залежить від ступеня магнітного насичення машини, тому що при явнополюсному роторі магнітний потік Φ_{aq} проходить через значний повітряний зазор міжполюсного простору.

4. Магнітний потік розсіювання обмотки статора індукує в обмотці статора ЕРС розсіювання E_{p1}

$$\dot{E}_{p1} = -j\dot{I}_1 x_{p1},$$

де x_{p1} —індуктивний опір розсіювання обмотки статора.

5. Струм у фазній обмотці статора I_1 створює активне спадання напруги

$$\dot{U}_{r1} = \dot{I}_1 r_1,$$

де r_1 — активний опір фазної обмотки статора.

Через малу величину активного опору r_1 активне спадання напруги невелике і навіть при номінальному струмі статора звичайно менше 1% від номінальної напруги на затисках генератора U_{IH} .

Геометрична сума всіх перерахованих вище величин дає значення напруги на затисках синхронного генератора U_1

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{p1} - \dot{U}_{r1}.$$

Отриманий вираз являє собою рівняння ЕРС явнополюсного синхронного генератора.

У неявнополюсних машинах індуктивні опори x_{ad} і x_{aq} приблизно однакові, тому що повітряний зазор у цих машинах за колом статора однаковий. Це дає можливість для неявнополюсного генератора реакцію якоря розглядати не окремо за подовжньою і поперечною складовими, а враховувати її за повною НС F_a і відповідною ЕРС

$$\dot{E}_a = -j\dot{I}_1 x_a.$$

Тут x_a — індуктивний опір обмотки статора, обумовлений реакцією якоря.

Крім того, оскільки потік якоря Φ_a і потік розсіювання Φ_{p1} створюються одним струмом, то індуктивний опір реакції якоря x_a і індуктивний опір розсіювання x_{p1} , доцільно розглядати як суму

$$x_c = x_a + x_{p1},$$

де x_c — синхронний опір неявнополюсної машини. У цьому випадку ЕРС реакції якоря і ЕРС розсіювання враховуються спільно

$$-j\dot{I}_1 x_a + (-j\dot{I}_1 x_{\delta 1}) = -j\dot{I}_1 x_c = \dot{E}_c,$$

тоді рівняння ЕРС для неявнополюсного синхронного генератора має вигляд

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_n - \dot{U}_{r1}.$$

4.2.4 Характеристики синхронного генератора

Властивості синхронного генератора визначаються характеристиками холостого ходу, короткого замикання і зовнішніми.

Характеристика холостого ходу синхронного генератора являє собою графік залежності напруги U_o у режимі холостого ходу генератора від струму збудження i_z при незмінній швидкості обертання ротора: $U_o = f(i_z)$ при $I_1 = 0$ і $n = \text{const}$. Схема включення синхронного генератора для зняття характеристики холостого ходу приведена на рис. 4.2.13, а.

Характеристика холостого ходу, а також інші характеристики синхронних генераторів зручніше будувати у відносних одиницях. При цьому по осях графіка відкладають не абсолютні значення величин, а їхні відносини до номінальних значень: по осі ординат $U_o / U_{1н}$, по осі абсцис $i_{z0} / i_{z0н}$.

Таким чином, за одиницю на осі напруг приймають напругу холостого ходу, що дорівнює номінальній $U_o = U_{1н}$, а за одиницю на осі струмів збудження приймають струм збудження $i_{z0н}$, що відповідає напрузі $U_o = U_{1н}$. Звичайно характеристики холостого ходу синхронних машин, що виражені у відносних одиницях, мало відрізняються одна від одної і відповідають деякій середній характеристиці, що названа *нормальною характеристикою холостого ходу* (рис. 4.2.13, б).

Характеристику короткого замикання $I_{1к} = f(i_z)$ можна одержати при досліді короткого замикання, що проводиться в наступному порядку: виводи статорної обмотки замикають накоротко (рис. 4.2.14, а) і приводять ротор машини в обертання з номінальною швидкістю. Потім збуджують машину, поступово збільшуючи струм збудження від нуля до значення, при якому струм короткого замикання перевищує номінальний робочий струм статорної обмотки не більше ніж на 25% ($I_{1к} = 1,25 I_{1н}$).

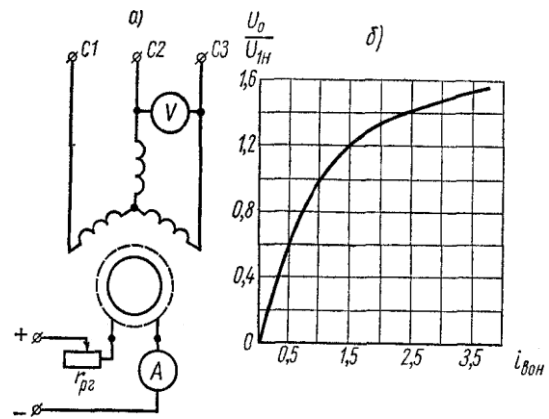


Рис. 4.2.13

Оскільки в цьому випадку ЕРС обмотки статора складає величину в декілька разів меншу, чим у робочому режимі генератора, і, отже, основний магнітний потік дуже малий, то магнітний ланцюг машини виявляється ненасиченим. З цієї причини характеристика короткого

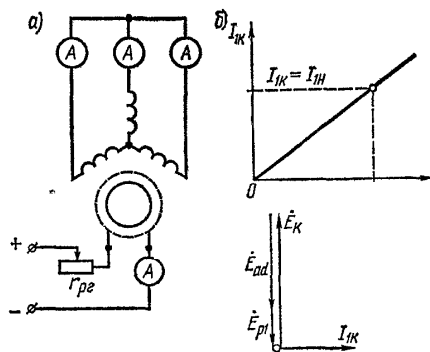


Рис. 4.2.14

замикання являє собою пряму лінію (рис. 4.2.14, б). Активний опір обмотки статора невеликий в порівнянні з її індуктивним опором. Тому, зневажаючи величиною r_1 , можна вважати, що при досліді короткого замикання навантаження синхронного генератора (його власні обмотки) є чисто індуктивні. З цього випливає, що при досліді короткого замикання реакція якоря синхронного генератора має характер, що подовжньо розмагнічує.

Векторна діаграма, побудована для генератора при досліді трифазного короткого замикання, зображена на рис. 4.2.14, б. З діаграми видно, що ЕРС E_{κ} що індукується в обмотці статора, цілком врівноважується ЕРС подовжньої реакції якоря $\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d x_{ad}$ і ЕРС розсіювання $\dot{E}_{p1} = -j\dot{I}_1 x_{p1}$

$$\dot{E}_{\kappa} = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{p1}.$$

При цьому НС обмотки збудження має наче дві складові: одна компенсує спадання напруги $j\dot{I}_1 x_{p1}$, а інша — вплив розмагнічувальної реакції якоря $j\dot{I}_d x_{ad}$.

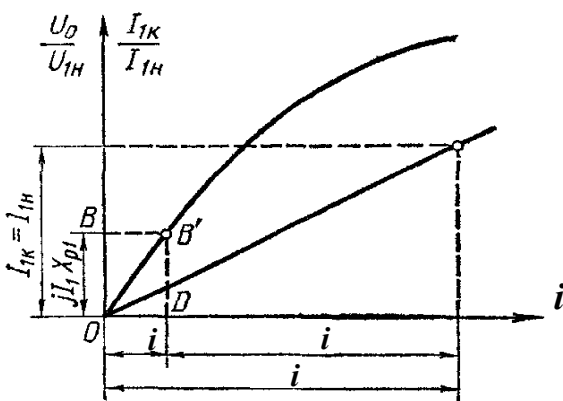


Рис. 4.2.15

Характеристики холостого ходу і короткого замикання дають можливість визначити значення струмів збудження, що відповідають зазначеним складовим НС збудження. З цією метою характеристики холостого ходу і короткого замикання синхронної машини будують в одній системі осей координат (рис. 4.2.15). На осі ординат відкладають відрізок OB , що виражає в масштабі

напруги величину ЕРС розсіювання $\dot{E}_{p1} = -j\dot{I}_1 x_{p1}$. Потім точку B зносять на характеристику холостого ходу (точка B') і опускають перпендикуляр B' на вісь абсцис. Отримана таким чином точка D розділила струм збудження $i_{зкн}$ на дві частини: $i_{зх}$ — струм збудження, необхідний для компенсації спадання напруги $j\dot{I}_1 x_{p1}$, і $i_{за}$ — струм збудження, що компенсує реакцію якоря, що подовжньо розмагнічує.

Одним з важливих параметрів синхронної машини є відношення короткого замикання (ВКЗ), що являє собою відношення струму збудження $i_{зон}$, відповідного номінальній напрузі при холостому ході до струму

збудження $i_{зкн}$, що відповідає номінальному струму статора при досліді короткого замикання (рис. 4.2.16),

$$BKЗ = \frac{i_{зон}}{i_{зкн}}$$

Значення $BKЗ$ звичайно лежать у межах: для турбогенераторів $BKЗ=0,5—0,7$, для гідрогенераторів $BKЗ=1,0—1,4$.

Величина $BKЗ$ має велике практичне значення при оцінці властивостей синхронної машини: машини з малою величиною $BKЗ$ менш стійкі при паралельній роботі, мають значні коливання напруги при змінах навантаження, але такі машини мають менші габарити і, отже, дешевші, ніж машини з великою величиною $BKЗ$; однак машини з великим $BKЗ$ більш стійкі в роботі.

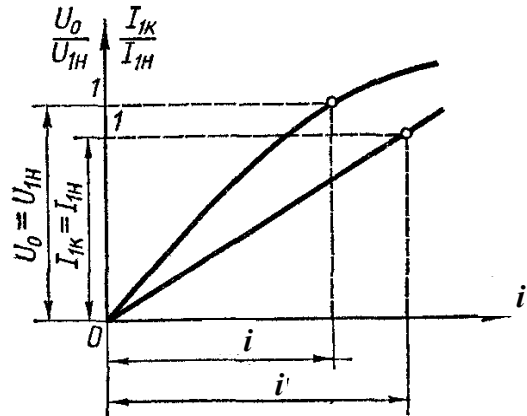


Рис. 4.2.16.

Зовнішня характеристика синхронного генератора являє собою залежність напруги на виводах статорної обмотки від величини струму навантаження: $U_1=f(I_1)$ при $i_3=const$; $\cos\varphi_1=const$; $n_1=n_n=const$. На рис. 4.2.17, а представлені зовнішні характеристики, що відповідають різним по характеру навантаженням синхронного генератора.

При знятті зовнішньої характеристики генератор навантажують до номінального струму ($I_1=I_{1н}$) при номінальній напрузі ($U_1=U_{1н}$) на виводах статорної обмотки. Потім поступово розвантажують генератор. При активному навантаженні (крива 1) зменшення навантажувального струму супроводжується ростом напруги, що пояснюється зменшенням спадання напруги в статорній обмотці й ослабленням потоку поперечної реакції якоря в насиченій машині. При індуктивному навантаженні (крива 2) збільшення напруги при скиданні навантаження буде більш інтенсивним, тому що зі зменшенням струму I_1 послаблюється розмагнічувальна дія реакції якоря. Однак у випадку ємнісного навантаження генератора (крива 3) зменшення струму I_1 супроводжується зменшенням напруги U_1 , що пояснюється ослабленням підмагнічувальної дії реакції якоря.

Зміна напруги синхронного генератора, що працює окремо від інших, при скиданні навантаження від номінального значення до нуля і при збереженні струму збудження і швидкості обертання незмінними називається *номінальною зміною (підвищенням) напруги*

$$\Delta U_n = \frac{E_o - U_{1н}}{U_{1н}} 100.$$

При ємнісному навантаженні генератора величина ΔU_n є негативною. Відповідно до існуючих норм підвищення напруги при скиданні навантаження не повинне перевищувати 50%.

Регульовальна характеристика синхронного генератора (рис. 4.2.17, б) показує, як варто змінювати струм збудження генератора при змінах навантаження, щоб напруга на затисках генератора залишалася незмінно-рівною номінальному:

$$i_3 = f(I_1) \text{ при } U_1 = U_{1н} = \text{const} \quad \text{і} \quad n_1 = n_n = \text{const.}$$

При активному навантаженні збільшення струму навантаження I_1 супроводжується зменшенням напруги U_1 . Тому для підтримки напруги

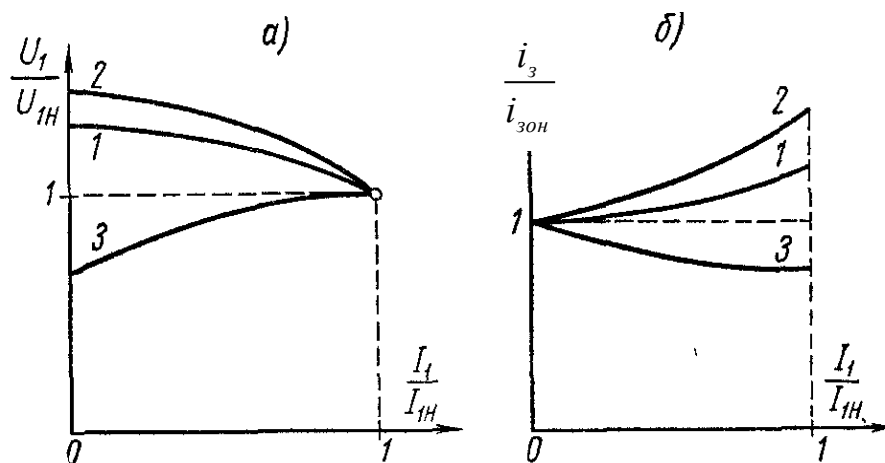


Рис. 4.2.17

незмінною у міру збільшення струму навантаження I_1 варто підвищувати струм збудження (крива 1).

Індуктивний характер навантаження викликає більш різке зниження напруги U_1 (див. рис. 4.2.17, а, крива 2), тому струм збудження, необхідний для підтримки $U_1 = U_{1н}$, варто підвищувати в більшому ступені (крива 2).

При ємнісному ж характері навантаження збільшення навантаження супроводжується ростом напруги U_1 , тому для підтримки $U_1 = U_{1н}$ струм збудження варто зменшувати (крива 3).

Струм в обмотці збудження синхронного генератора регулюється або зміною опору регульовального реостата r_1 (див. рис. 4.2.17, а) у ланцюзі збудження генератора (безпосереднє регулювання), або зміною напруги на затисках збудника, що досягається регулюванням величини струму збудження збудника за допомогою регульовального реостата r_2 (непряме регулювання). Другий спосіб регулювання струму збудження є економічно більш вигідним і технічно більш зручним. Оскільки струм збудження збудника набагато менше струму збудження синхронного генератора, то для непрямого регулювання вимагаються реостати менших розмірів, чим при безпосередньому регулюванні. Втрати енергії в колі збудження при цьому зменшуються.

Можливий також змішаний спосіб регулювання, при якому реостатами r_1 і r_2 здійснюється відповідно тонке і грубе регулювання струму. Однак при

часто мінливому навантаженні регулювання напруги вручну за допомогою реостатів у колі збудження стає неможливим. Тому в практиці експлуатації синхронних генераторів застосовують автоматичне регулювання напруги.

Умови та способи включення синхронних генераторів на паралельну роботу

На електричних станціях, як правило, встановлюють кілька синхронних генераторів, що включаються паралельно для спільної роботи. Наявність декількох генераторів замість однієї сумарної потужності дає переваги, які пояснюються тими ж міркуваннями, що були викладені для трансформаторів.

При включенні синхронного генератора в мережу на паралельну роботу необхідно дотримуватись таких умов:

- 1) ЕРС генератора E_o в момент підключення його до мережі повинна бути однакою і протилежна по фазі напрузі мережі $\dot{E}_o = -\dot{U}_i$;
- 2) частота ЕРС генератора f_z повинна бути однаковою з частотою змінної напруги в мережі f_m ;
- 3) порядок проходження фаз на виводах генератора повинен бути таким же, що і на затисках мережі.

Приведення генератора в стан, що задовольняє всі зазначені умови, називається *синхронізацією*. Недотримання кожної з умов синхронізації приводить до появи в обмотці статора великих зрівняльних струмів, надмірна величина яких може бути причиною аварії.

Ввімкнути генератор в мережу з паралельно працюючими генераторами можна способом точної синхронізації чи способом самосинхронізації.

Спосіб точної синхронізації. Сутність цього способу полягає в тому, що, перш ніж включити генератор в мережу, його приводять в стан, що задовольняє всі перераховані вище умови. Момент дотримання цих умов, тобто момент синхронізації, визначається приладом, що названий *синхроскопом*. По своїй конструкції синхроскопи розділяються на стрілочні і лампові. Розглянемо процес синхронізації генератора з застосуванням лампового синхроскопа.

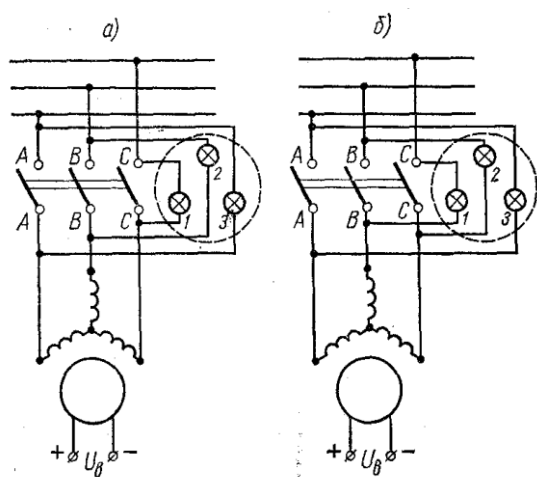


Рис. 4.2.18

Ламповий синхроскоп складається з трьох ламп, розташованих у вершинах рівнобіжного трикутника. Лампи можуть включатися або за схемою «на загасання» (рис. 4.2.18, а) або за схемою «на обертання світла» (рис. 4.2.18, б).

При включенні ламп за схемою «на загасання» момент синхронізації відповідає одночасному загасанню всіх ламп.. При великій різниці кутових швидкостей (частот) ω_2 і ω_m лампи спалахують часто.

Змінюючи швидкість обертання первинного двигуна, домагаються рівності $\omega_2 = \omega_m$ про що буде свідчити загасання ламп на тривалий час. У цей момент і варто замкнути рубильник, після чого генератор виявиться підключеним до мережі.

При включенні ламп синхроскопа за схемою «на обертання світла» при розбіжності частот ω_2 и ω_m лампи загоряються поперемінно, по колу, створюючи ефект «обертання світла». Причому, якщо $\omega_2 > \omega_m$, то «обертання світла» відбувається в одну сторону, а якщо $\omega_2 < \omega_m$ – в іншу.

Моменту синхронізації відповідає горіння двох ламп з однаковою яскравістю і загасання лампи, включеної в розрив фази A . Слід зазначити, що якщо порядок проходження фаз генератора відрізняється від порядку проходження фаз мережі (наприклад, в мережі C , а в генератора B), то лампи синхроскопа, що включені за схемою «на загасання», поведуться, як при включенні «на обертання світла». Для створення необхідного порядку проходження фаз необхідно поміняти місцями будь-які дві фази на виводах генератора. Процес точної синхронізації на електростанціях звичайно автоматизують.

Спосіб самосинхронізації. Ротор незбудженого генератора приводиться в обертання первинним двигуном до швидкості, що відрізняється від синхронної не більше ніж на 2-5%, після чого генератор підключається до мережі. Для того щоб уникнути перенапруги в обмотці ротора в момент підключення генератора до мережі, її замикають на деякий опір. Відразу ж після підключення генератора до мережі обмотку збудження підключають на клеми збудника, і генератор починає працювати синхронно. Оскільки в момент підключення генератора до мережі його ЕРС дорівнює нулю (генератор не збуджений), то під дією напруги мережі в обмотці статора спостерігається різкий кидок струму, що перевищує номінальне значення струму генератора. Одночасно на валу ротора з'являються механічні зусилля. Але, як показує досвід, вони не небезпечні для генератора. Протягом 1-7 секунд після моменту підключення генератора струм в обмотці статора спадає до номінального значення.

Навантаження генератора, включеного на паралельну роботу.

Після включення генератора в мережу, при дотриманні всіх умов синхронізації, його ЕРС E_o дорівнює по величині і протилежна по напрямку напрузі мережі (рис. 4.2.19, a), тому струм у ланцюзі генератора дорівнює нулю, тобто генератор працює без навантаження.

Якщо збільшити обертаючий момент первинного двигуна, то ротор машини, одержавши деяке прискорення, зміститься щодо свого первісного положення на кут θ у бік обертання. На такий же кут θ виявиться зрушеним вектор ЕРС генератора \dot{E}_0 щодо свого первісного положення. Під дією

результуючої ЕРС $\Delta \dot{E}$, що дорівнює геометричній сумі ЕРС \dot{E}_0 і напруги \dot{U}_i в ланцюзі генератора з'явиться струм \dot{I}_1 (рис. 4.2.19, б).

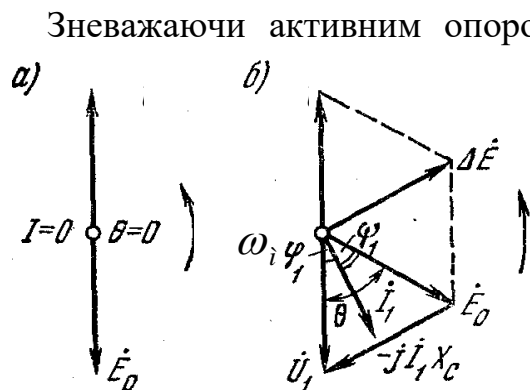


Рис. 4.2.19

Зневажаючи активним опором обмотки статора через його незначну величину, будемо вважати, що обмотка статора має чисто індуктивний опір і струм \dot{I}_1 відстає по фазі від ЕРС $\Delta \dot{E}$ на 90° . В таких умовах генератор віддає в мережу активну потужність $P_2 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1$, а напруга мережі \dot{U}_i врівноважується напругою генератора \dot{U}_1 .

Струм у провідниках обмотки статора взаємодіє з магнітним потоком ротора. В результаті цієї взаємодії на кожен провідник обмотки статора діє сила F_{em} яка створює на полюсах ротора рівну по величині і протилежну по напрямку силу F'_{ai} (рис. 4.2.20): $F_{ai} = -F'_{ai}$.

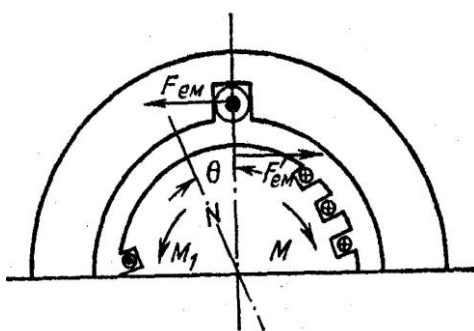


Рис. 4.2.20.

Сукупність сил F'_{ai} від усіх провідників обмотки статора створює на роторі електромагнітний момент M , спрямований проти обертання ротора, тобто проти обертаючого моменту первинного двигуна M_1 .

Таким чином, з появою в ланцюзі статора струму I_1 генератор одержує електричне навантаження, а первинний двигун — механічне навантаження. Тепер механічна потужність P_1 первинного двигуна частково витрачається на покриття втрат холостого ходу генератора, а частково перетворюється в електромагнітну потужність P_{em} генератора, що являє собою активну потужність у ланцюзі статора

Таким чином, з появою в ланцюзі статора струму I_1 генератор одержує електричне навантаження, а первинний двигун — механічне навантаження. Тепер механічна потужність P_1 первинного двигуна частково витрачається на покриття втрат холостого ходу генератора, а частково перетворюється в електромагнітну потужність P_{em} генератора, що являє собою активну потужність у ланцюзі статора

$$P_1 = P_o + P_{em},$$

де P_{em} — електромагнітна потужність генератора.

Отже, потужність на виході синхронного генератора P_2 (активне навантаження) при його паралельній роботі регулюється зміною обертаючого моменту первинного двигуна, тому що

$$P_2 = P_{em} - m_1 I_1^2 r_1.$$

Раніше ми розглядали паралельну роботу синхронного генератора при незмінному струмі збудження. Що ж відбудеться в синхронному генераторі, якщо після підключення його до мережі

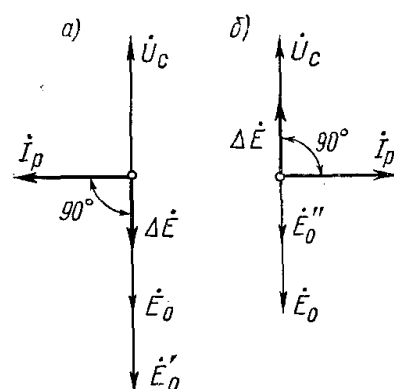


Рис. 4.2.21

для паралельної роботи змінити струм в його обмотці збудження, залишивши незмінним обертаючий момент первинного двигуна? Припустимо, що генератор після підключення на мережу працює без навантаження і його ЕРС E_o врівноважує напругу мережі U_m . Якщо при цьому збільшити струм в обмотці збудження, тобто *перезбудити* машину, то ЕРС E_o збільшиться до значення E'_o й в ланцюзі генератора з'явиться надлишкова ЕРС $\Delta \dot{E} = \dot{E}'_o - \dot{U}_i$ (рис. 4.2.21, а), вектор якої збігається по напрямку з вектором ЕРС \dot{E}_o . Струм \dot{I}_1 , викликаний ЕРС $\Delta \dot{E}$, буде відставати від неї по фазі на 90° (оскільки $r_1 \approx 0$). Стосовно ЕРС \dot{E}_o цей струм також буде відстаючим (індуктивним). Зі збільшенням перезбудження величина реактивного струму збільшиться.

Якщо ж після того, як генератор підключити до мережі, зменшити струм збудження, тобто *недозбудити* машину, то ЕРС E_o зменшиться до значення E''_o й в ланцюзі генератора знову буде діяти надлишкова ЕРС $\Delta \dot{E} = \dot{U}_i - \dot{E}''_o$. Тепер вектор цієї ЕРС буде збігатися по напрямку з вектором напруги мережі \dot{U}_i (рис. 4.2.21, б), а тому струм \dot{I}_1 , викликаний цією ЕРС і відстаючий від неї по фазі на 90° , буде випереджальним (ємнісним) стосовно ЕРС генератора \dot{E}_o .

Показане на діаграмах рис. 4.2.21 можна пояснити наступним.

При перезбудженні генератора збільшується НС збудження $F_o = i_z \omega_z$. Це супроводжується появою в обмотці статора реактивного струму I_p , що стосовно ЕРС є відстаючим (індуктивним). Викликана цим струмом подовжньо-розмагнічувальна реакція якоря компенсує надлишкову НС збудження так, що ЕРС генератора залишається незмінною. Такий же процес відбувається і при недозбудженні генератора, з тією лише різницею, що в обмотці з'являється випереджальний (ємнісний) струм I_p , а викликана цим струмом подовжньо-намагнічувальна реакція якоря компенсує відсутню НС збудження.

Якщо при всіх змінах струму збудження обертаючий момент первинного двигуна залишається незмінним, то також незмінною залишиться активна потужність генератора

$$P_2 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \text{const.}$$

З цього виразу випливає, що при $U_1 = \text{const}$ активна складова струму статора $I_1 \cos \varphi_1 = \text{const}$.

Таким чином, ступінь збудження синхронного генератора впливає тільки на реактивну складову струму статора. Що ж стосується активної складової струму $I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1$, то вона залишається незмінною.

Залежність струму статора I_1 від струму в обмотці збудження i_3 при незмінному активному навантаженні генератора виражається графічно U-подібною кривою. Така назва пояснюється зовнішньою подібністю цієї кривої з латинською буквою U. На рис. 4.2.22 зображені U-подібні криві $I_1 = f(i_3)$ при $P_2 = const$. Криві побудовані для різних значень активного навантаження: $P_2 = 0$; $P_2 = 0,5P_n$ і $P_2 = P_n$. U-подібні криві синхронного генератора показують, що будь-якому навантаженню генератора відповідає таке значення струму збудження i_3 , при якому струм статора I_1 стає мінімальним і дорівнює тільки активній складовій $I_{1min} = I_1 \cos \varphi_1$. У цьому

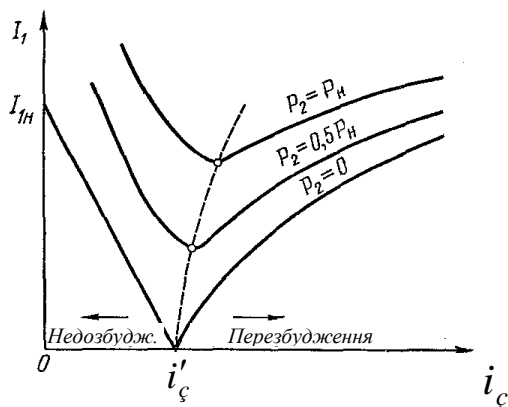


Рис. 4.2.22.

випадку генератор працює при коефіцієнті потужності $\cos \varphi_1 = 1$. Значення струму збудження, що відповідають $\cos \varphi_1 = 1$ при різному навантаженні генератора, показані на рис. 4.2.22 пунктирною кривою. Деяке відхилення цієї кривої вправо вказує на те, що при збільшенні навантаження струм збудження, що відповідає $\cos \varphi_1 = 1$, трохи зростає. Пояснюється це тим, що при рості навантаження необхідно деяке збільшення струму збудження, що компенсує активне спадання напруги.

Варто звернути увагу на те, що струм \dot{I}_p , що відстає по фазі від ЕРС \dot{E}_0 , стосовно напруги мережі \dot{U}_i , є випереджальним струмом, і, навпаки, струм \dot{I}_p , що випереджає по фазі ЕРС \dot{E}_0 стосовно напруги \dot{U}_i , є відстаючим.

З погляду зменшення втрат генератора, найбільш вигідним є збудження, що відповідає мінімальному струму статора, тобто коли $\cos \varphi_1 = 1$.

Але в більшості випадків навантаження генератора має індуктивний характер і для компенсації індуктивних струмів (що відстають по фазі від напруги мережі) приходиться трохи перезбуджувати генератор, створюючи умови, при яких струм статора \dot{I}_1 випереджає по фазі напругу мережі \dot{U}_i .

4.3 СИНХРОННІ ДВИГУНИ

4.3.1 Принцип дії синхронного двигуна

Відповідно до принципу оборотності, синхронна машина може працювати не тільки в режимі генератора, але й у режимі двигуна.

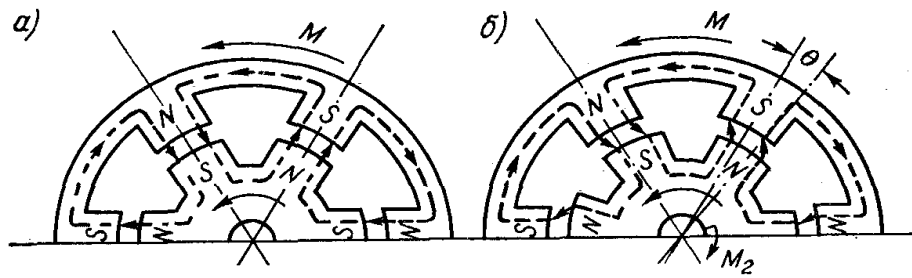


Рис. 4.3.1.

Якщо вал синхронного генератора, що працює паралельно з мережею, відключити від первинного двигуна, не відключаючи ланцюгів статора і ротора, то синхронна машина буде працювати в режимі двигуна. У цьому випадку трифазний струм в обмотці статора синхронної машини створює обертове магнітне поле, що, взаємодіючи з магнітним полем ротора, змушує обертатися ротор із синхронною швидкістю.

Для з'ясування принципу роботи синхронного двигуна звернемося до його моделі (див. рис. 4.3.1), що складається з зовнішньої і внутрішньої магнітних систем з явно вираженими полюсами, розділених зазором. Обидві системи можуть обертатися щодо загальної осі, при цьому внутрішня система (ротор) розташована на валу.

Якщо до зовнішньої магнітної системи прикласти обертаючий момент M , то вона почне обертатися і створить обертове поле, аналогічне обертовому магнітному полю обмотки статора при підключенні її до мережі трифазного струму.

Завдяки магнітному зв'язку між різнойменними полюсами магнітних систем обертання зовнішньої системи полюсів передається внутрішній системі. У результаті ротор починає обертатися в ту ж сторону, що і поле зовнішньої системи. Якщо зневажити тертя, то можна вважати, що в режимі холостого ходу момент, що протидіє обертанню, дорівнює нулю. Тоді полюси магнітних систем, обертаючись в одну сторону з однаковою швидкістю, розташовуються один проти одного (рис. 4.3.1, а). Якщо ж до вала прикласти гальмуюче зусилля у виді протидіючого моменту M_2 , то внутрішня система полюсів зміститься щодо зовнішньої системи на кут θ (рис. 4.3.1, б), значення якого визначається величиною протидіючого моменту.

У синхронному двигуні, на відміну від розглянутої моделі, що обертається, поле створюється не обертанням магнітної системи, а трифазним струмом в обмотці статора. При цьому потужність, що розвивається на валу двигуна, компенсується потужністю, що надходить з мережі.

Таким чином, у синхронному двигуні (так само, як і в генераторі) взаємодією струму статора з магнітним полем ротора створюється електромагнітний момент, але на відміну від генератора цей момент у двигуні є обертаючим.

При змінах навантаження на валу синхронного двигуна відбуваються зміни кута θ між вектором НС ротора і вектором НС обмотки статора, що

супроводжується відповідною зміною електромагнітного обертаючого моменту. Але якщо в синхронному генераторі збільшення навантаження супроводжується збільшенням кута θ у напрямку обертання ротора, тобто вектор НС ротора (вісь полюсів ротора) генератора випереджає вектор НС статора, то в двигуні збільшення навантаження на вал супроводжується збільшенням кута θ у напрямку, протилежному обертанню ротора.

Слід зазначити, що ротор синхронного двигуна може обертатися тільки зі швидкістю, що дорівнює швидкості обертання поля статора, тобто із синхронною швидкістю $n = \frac{f_1 60}{p}$. Щоб переконатися в цьому, звернемося

знову до моделі синхронного двигуна (див. рис. 4.3.1). Припустимо, що ротор двигуна при обертанні відстає від зовнішньої системи полюсів. Тоді в якийсь момент часу полюси ротора розташуються проти однойменних полюсів зовнішньої системи. У цьому випадку, порушиться магнітний зв'язок між магнітними системами, тому що їх полюси будуть взаємно відштовхуватися; ротор перестане випробовувати дію електромагнітного моменту і зупиниться.

При змінах навантаження синхронного двигуна міняється кут θ . При цьому ротор внаслідок інерції обертових мас агрегату не відразу займає положення, що відповідає новому навантаженню, а якийсь час робить коливальні рухи. Таким чином, у синхронному двигуні, також як і в генераторі, мають місце коливання.

У процесі роботи синхронного двигуна в обмотці статора індукується ЕРС E_1 , величина якої приблизно дорівнює підведеній до обмотки статора напрузі U_1 . ЕРС обмотки статора створюється результируючим магнітним потоком, викликаним спільною дією двох сил, що намагнічують: НС ротора і НС статора.

При постійній напрузі $U_1 \approx (-\dot{E}_1) = const$ результируючий потік Φ залишається постійним. А тому при зміні однієї із намагнічуючих сил, що створюють результируючий потік Φ , інша намагнічуюча сила, змінюється в протилежному напрямку, так що їхня спільна дія залишається незмінною.

Зі сказаного випливає, що при збільшенні струму збудження i_z зростає НС ротора, при цьому НС статора зменшується. Зменшення НС статора може відбутися тільки за рахунок зменшення складової струму статора, що

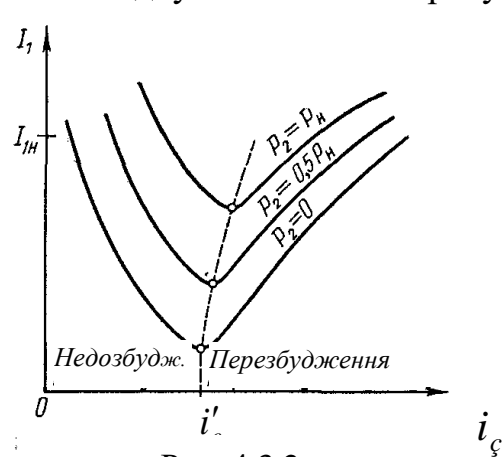


Рис. 4.3.2

намагнічує, тому що число витків в обмотці статора залишається незмінним. Зменшення струму статора, що намагнічує, який є по своїй природі індуктивним, веде до підвищення коефіцієнта потужності двигуна.

Подальше збільшення струму в обмотці збудження буде супроводжуватися зменшенням струму в статорній обмотці (за рахунок реактивної складової) і, нарешті,

при деякому значенні струму збудження i'_ζ струм I_1 досягає мінімальної величини (рис. 4.3.2) при даному навантаженні двигуна. При цьому струм статора стає чисто активним, а коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1=1$. Збільшення струму збудження понад величину i'_ζ , тобто перезбудження двигуна, викликає збільшення струму I_1 , але тепер цей струм буде випереджальним (ємнісним) стосовно напруги \dot{U}_1 . Таким чином, при недозбудженні синхронний двигун працює з відстаючим струмом, а при перезбудженні — з випереджальним. Залежність струму статора від струму збудження i_3 для синхронного двигуна зображена U-подібними кривими (рис. 4.3.2). Струм збудження i'_3 відповідає роботі синхронного двигуна при коефіцієнті потужності $\cos\varphi_1=1$. При перезбудженні двигуна ($i_3 > i'_3$) у колі статора з'являється випереджальний струм; інакше кажучи, включення в мережу перезбудженого синхронного двигуна еквівалентно включенню в цю мережу деякої ємності. Зазначена особливість синхронних двигунів є їхньою важливою якістю, що використовується для підвищення коефіцієнта потужності електричних установок. Звичайно синхронні двигуни працюють при коефіцієнті потужності, що дорівнює одиниці, тому що при цьому двигун має мінімальні втрати і найбільший ККД.

4.3.2 Робочі характеристики синхронного двигуна

Робочі характеристики синхронного двигуна являють собою залежність швидкості обертання ротора n_2 , струму в обмотці статора I_1 , потужності на вході двигуна P_1 , корисного моменту M_2 і коефіцієнта потужності $\cos\varphi_1$ від корисної потужності двигуна P_2 (рис. 4.3.3).

Швидкість обертання ротора n_2 завжди дорівнює синхронній швидкості $n = \frac{f_1 60}{p}$, а тому графік $n_2=f(P_2)$ має вид прямої, що паралельна осі абсцис.

Корисний момент на валу синхронного двигуна знаходиться в такій залежності від потужності P_2 :

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_1}.$$

Оскільки робочі характеристики знімаються за умови $\omega_1 = const$, то графік $M_2=f(P_2)$ має вид прямої, що виходить з початку координат.

Потужність на вході двигуна

$$P_1 = P_2 + \Sigma p.$$

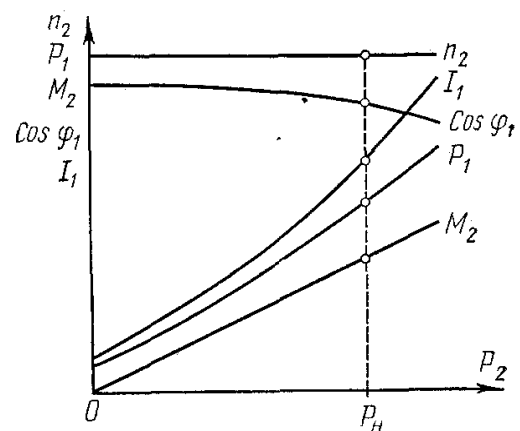


Рис. 4.3.3

Зі збільшенням навантаження P_2 збільшуються також і втрати Σp , тому потужність P_1 росте трохи швидше потужності P_2 , і графік $P_1=f(P_2)$ має трохи криволінійний вид.

Крива $\cos\varphi_1=f(P_2)$ залежить від характеру збудження двигуна в режимі холостого ходу. Якщо при холостому ході $\cos\varphi_1=1$, то при збільшенні навантаження він зменшується.

Величина струму в обмотці статора двигуна дорівнює

$$I_1 = \frac{P_1}{m_1 U_1 \cos \varphi_1}.$$

З цього виразу видно, що струм I_1 зі збільшенням навантаження P_2 росте швидше, ніж потужність P_1 , внаслідок зменшення $\cos\varphi_1$.

Оскільки ротор синхронного двигуна обертається в ту ж сторону, що і поле статора, то напрямок обертання ротора визначається порядком проходження фаз в обмотці статора і порядком розташування фазних обмоток статора. Для зміни напрямку обертання трифазного синхронного двигуна необхідно переключити два лінійних проводи, підведені з мережі до обмоток статора.

4.3.3 Пуск у хід синхронних двигунів

Пуск у хід синхронного двигуна безпосереднім включенням у мережу неможливий, тому що ротор через свою значну інерцію не може бути відразу захоплений обертовим полем статора, швидкість якого встановлюється миттєво. У результаті магнітний зв'язок між статором і ротором не виникає. Для пуску синхронного двигуна приходиться застосовувати спеціальні способи, сутність яких полягає в попередньому приведенні ротора в обертання до синхронної чи близької до неї швидкості, при якій між статором і ротором встановлюється магнітний зв'язок.

Практичне застосування мають два способи пуску в хід синхронних двигунів: пуск за допомогою допоміжного двигуна й асинхронний пуск.

Пуск у хід синхронного двигуна за допомогою допоміжного двигуна

Процес пуску при цьому протікає аналогічно процесу включення синхронного генератора на паралельну роботу. Ротор збудженого двигуна приводиться в обертання до синхронної швидкості і за допомогою синхронізуючого пристрою підключається до мережі. Потім допоміжний двигун відключають. Звичайно потужність пускового двигуна складає 5—15% від потужності синхронного двигуна. Це дозволяє пускати в хід синхронний двигун тільки без навантаження чи при малому навантаженні на валу. Застосування пускового двигуна потужністю, достатньою для пуску синхронного двигуна під навантаженням, недоцільно, тому що при цьому установка виходить громіздкою і неекономічною. Як пусковий (допоміжний) двигун звичайно застосовують асинхронний двигун з фазним ротором з числом полюсів на два менше, ніж число полюсів синхронного

двигуна. Це робиться для того, щоб можливо було ротор синхронного двигуна привести в обертання зі швидкістю, близькою до синхронного. Для регулювання швидкості обертання в коло ротора асинхронного двигуна включають регульовальний реостат. В даний час описаний спосіб пуску застосовується лише для потужних синхронних компенсаторів (СК).

Асинхронний пуск синхронних двигунів

Цей спосіб можливий при наявності в полюсних наконечниках ротора пускової обмотки, що аналогічна заспокійливій обмотці синхронного генератора. В явнополюсних машинах заспокійлива обмотка виконується у виді стрижнів, закладених у пази полюсних наконечників і з'єднаних на торцевих сторонах пластинами (рис. 4.3.4).

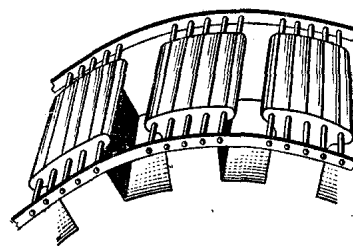


Рис. 4.3.4

Схема включення двигуна при цьому способі пуску приведена на рис. 4.3.5. Незбуджений синхронний двигун підключається до мережі трифазного струму. Обертове магнітне поле статора при цьому індукуює у пусковій обмотці ротора ЕРС, що створює в замкнутих стрижнях обмотки струми. Взаємодією цих струмів з полем статора створюється момент, що приводить ротор двигуна в обертання. При досягненні швидкості обертання ротора, що складає приблизно 95% синхронної швидкості, подається живлення в обмотку збудження, і двигун починає працювати синхронно. У цьому випадку пускова обмотка не впливає на роботу двигуна, тому що в її стрижнях ЕРС не наводиться.

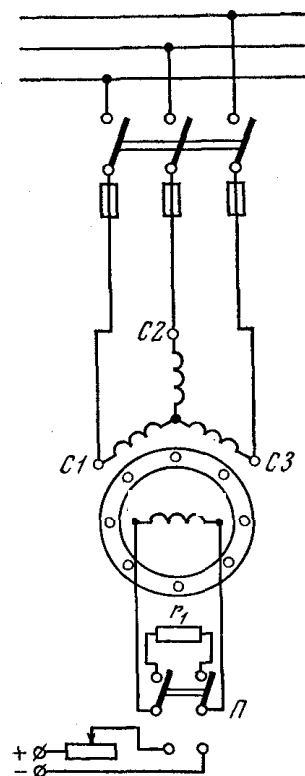


Рис. 4.3.5.

У процесі асинхронного пуску обмотку збудження залишати розімкнутою не можна, тому що магнітний потік статора, що перетинає її в початковий період пуску із синхронною швидкістю, індукуює у ній ЕРС. Внаслідок великого числа витків обмотки збудження ця ЕРС досягає 3000—4000 В і більше, що становить небезпеку як для цілості самої обмотки, так і для обслуговуючого персоналу. Для запобігання цього обмотку збудження на період розгону ротора замикають на активний опір r_1 , який приблизно в десять разів більше опору обмотки збудження. Переключення затисків обмотки збудження з опору r_1 на виводи збудника здійснюється за допомогою перемикача Π (рис. 4.3.5).

Контрольні питання

1. Який принцип дії синхронного генератора?
2. Яка будова синхронних машин?
3. Які існують типи синхронних машин, чим відрізняється конструкція їх роторів?
4. Назвіть особливості укладання обмоток статора.
5. Як формується магнітне поле статора? В чому проявляється явище реакції якоря?
6. Назвіть умови включення СГ на паралельну роботу?
7. Як розподіляється навантаження паралельно працюючих генераторів?
8. Який принцип дії синхронного двигуна?
9. Наведіть кутові характеристики СГ та СД, вкажіть їх різницю при різних типах роторів.
10. Як здійснюється пуск у хід синхронних двигунів?

Розділ 5

АСИНХРОННІ МАШИНИ

5.1 ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА АСИНХРОННИХ МАШИН

Робота асинхронних машин заснована на взаємодії обертового магнітного поля статора зі струмами в обмотці ротора.

На відміну від синхронних машин швидкість обертання ротора асинхронної машини залежить не тільки від частоти прикладеної напруги, але і від величини навантаження (протидіючого моменту на валу).

Асинхронна машина має властивість оборотності і може працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Однак найбільш практичне застосування одержали асинхронні двигуни (АСД). Вигідно відрізняючись від інших електродвигунів простотою конструкції і надійністю в роботі, асинхронні двигуни в наш час є основним типом електродвигуна, що застосовується для привода різних механізмів у промисловості, на будівництві, у сільському господарстві.

5.1.1 Принцип дії трифазного асинхронного двигуна

Нерухома частина асинхронного двигуна — статор має трифазну обмотку, при включенні якої в мережу виникає обертове магнітне поле. Швидкість обертання цього поля

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

У розточенні статора розташована обертова частина двигуна — ротор, що складається з вала, осердя й обмотки (рис. 5.1.1). Обмотка ротора складається зі стрижнів, покладених у пази осердя і замкнута із двох сторін кільцями.

Обертове поле статора перетинає провідники (стрижні) обмотки ротора і наводить у них ЕРС Але оскільки обмотка ротора замкнута, то в стрижнях виникають струми. Взаємодія цих струмів з полем статора створює в провідниках обмотки ротора електромагнітні сили F_{np} , напрямом яких визначається за правилом «лівої руки». Як видно з рис. 5.1.1, сили F_{np} прагнуть повернути ротор у напрямку обертання магнітного поля статора.

Сукупність сил F_{np} , прикладених до окремих провідників, створює на роторі електромагнітний момент M , що приводить його в обертання зі швидкістю n_2 . Обертання ротора через вал передається виконавчому механізму.

Таким чином, електрична енергія, що надходить в обмотку статора з мережі, перетвориться в механічну.

Напрямок обертання магнітного поля статора, а отже, і напрямом обертання ротора, залежить від порядку проходження фаз напруги, що

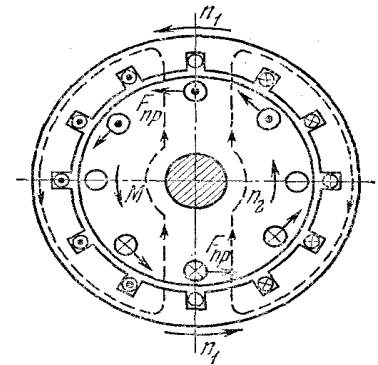


Рис. 5.1.1

підведена до обмотки статора. При необхідності змінити напрямок обертання ротора асинхронного двигуна варто поміняти місцями будь-яку пару проводів, що з'єднують обмотку статора з мережею. Наприклад, порядок проходження фаз *ABC* замінити порядком *CBA*. Швидкість обертання ротора n_2 асинхронних двигунів завжди менше швидкості обертання поля n_1 , тому що тільки в цьому випадку можливе наведення ЕРС в обмотці ротора. Різниця швидкостей ротора й обертового поля статора характеризується величиною, яка називається *ковзанням*

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

Часто ковзання виражається у відсотках $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%$.

Ковзання асинхронного двигуна може змінюватися в межах від 0 до 1. При цьому $s \approx 0$ відповідає режиму холостого ходу, коли ротор двигуна не випробує протидіючих моментів, а $s = 1$ відповідає режиму короткого замикання, коли протидіючий момент двигуна перевищує обертаючий момент і тому ротор двигуна нерухомий ($n_2 = 0$).

Ковзання, що відповідає номінальному навантаженню двигуна, називається *номінальним ковзанням*. Так, наприклад, для двигунів нормального виконання потужністю від 1 до 1000 кВт номінальне ковзання приблизно складає відповідно 0,06—0,01, тобто 6—1%.

Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна дорівнює

$$n_2 = n_1(1 - s)$$

На щитку двигуна вказується номінальна швидкість обертання n_2 . Ця величина дає можливість визначити синхронну швидкість обертання n_1 , номінальне ковзання s , а також число полюсів обмотки статора $2p$.

5.1.2 Будова асинхронних двигунів

За своєю будовою асинхронні двигуни розділяються на два типи, що відрізняються один від одного лише конструкцією ротора: двигуни з короткозамкненим ротором і двигуни з фазним ротором, що називають також двигунами з контактними кільцями. На рис. 5.1.2 показана будова трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, а на рис. 5.1.3 — трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором. Розглянемо конструкцію основних частин цих двигунів.

Статор асинхронного двигуна конструктивно не відрізняється від статора синхронної машини. Він складається з корпусу, осердя й обмотки.

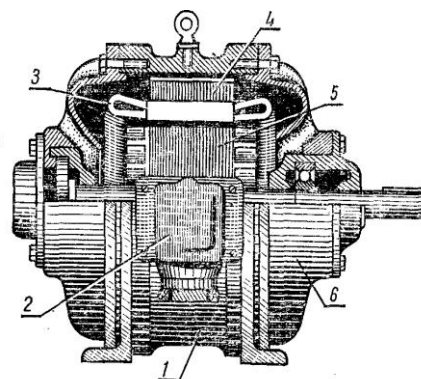


Рис. 5.1.2

Корпус статора служить для кріплення осердя з обмоткою і підшипниковими щитами. У невеликих двигунах корпус виготовляють виливом зі сталі чи чавуна, у великих машинах — роблять звареним.

Осердя статора збирають з листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 чи 0,5 мм, що до зборки покривають по обидва боки ізоляційним лаком, що обмежує величину вихрових струмів у сталі осердя. На внутрішній поверхні осердя є подовжні пази, у яких покладена обмотка статора.

Обмотки статора виконують по тому ж принципі, що й обмотки синхронних машин. Обмотки можуть бути одношарові чи двошарові, з повним чи скороченим кроком.

Найчастіше статорну обмотку роблять двошаровою зі скороченим кроком. Кінці обмотки виводять на затиски коробки виводів і позначають відповідно до рис. 5.1.4, а

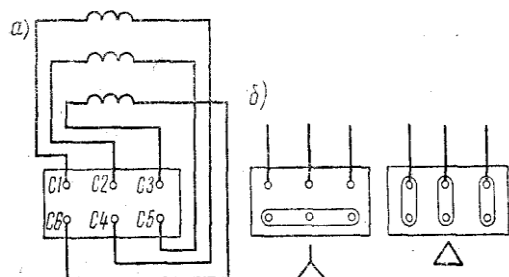


Рис. 5.1.4

Обмотку статора асинхронного двигуна можна з'єднати зіркою чи трикутником. Це дає можливість застосовувати ті ж самі двигуни при двох різних напругах мережі, що знаходяться у відношенні $\sqrt{3}$, наприклад 127/220 чи 220/380 В. При цьому з'єднанню обмотки зіркою відповідає включення двигуна на вищу напругу. Так, якщо двигун розрахований на напруги 220/380 В, то при напрузі мережі 380 В його статорну обмотку варто з'єднати зіркою, а при напрузі мережі 220 В — трикутником. В обох випадках фазна напруга залишається рівною 220 В. Для спрощення зазначених переключень затиски обмоток статора розташовують у визначеному порядку (рис. 5.1.4, б).

Ротор асинхронного двигуна складається з вала, осердя й обмотки. Осердя ротора має циліндричну форму і, так само як і осердя статора, збирається з листів електротехнічної сталі.

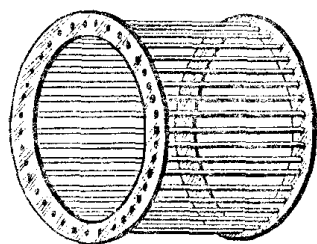


Рис. 5.1.5.

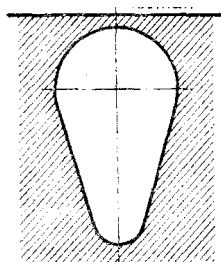


Рис. 5.1.6.

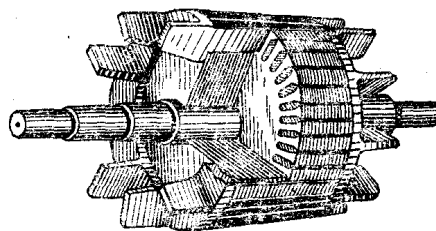


Рис. 5.1.7.

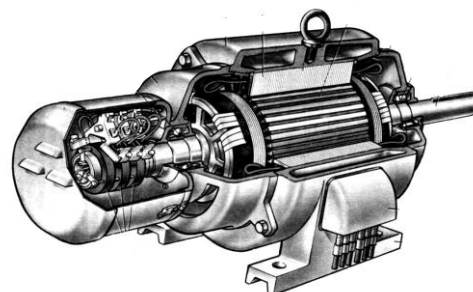


Рис. 5.1.3

У двигунах з короткозамкненим ротором обмотка ротора являє собою ряд мідних чи алюмінієвих стрижнів, розташованих у пазах осердя ротора і замкнених по торцях кільцями (рис. 5.1.5). Пази ротора звичайно мають овальну форму (рис. 5.1.6); вони перекриті іноді містком товщиною приблизно 0,5 мм. У двигунах потужністю до 100 кВт обмотка ротора виконується заливанням пазів розплавленим алюмінієм під тиском. При цьому одночасно відливаються і замикаючі кільця разом з вентиляційними крилами (рис. 5.1.7).

Двигун з фазним ротором (рис. 5.1.3), крім зазначених вище частин, має три контактних кільця. Кільця кріпляться на втулці, що жорстко насаджується на вал. Контактні кільця ізолюються від втулки і один від одного (рис. 5.1.8).

Для установки щіток двигун має шість щіткотримачів (по два на кожне контактне кільце).

Для зменшення втрат і зносу щіток деякі двигуни з фазним ротором середньої і великої потужності забезпечуються спеціальним механізмом, що дозволяє після пуску двигуна піднімати щітки, одночасно замикаючи накоротко контактні кільця.

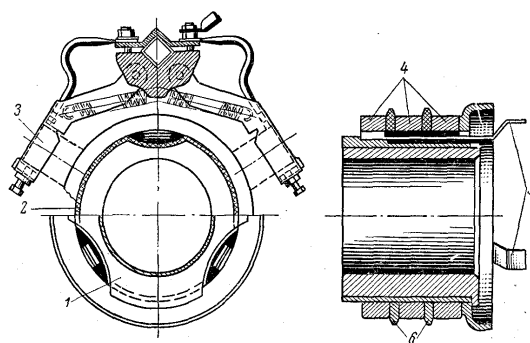


Рис. 5.1.8.

Обмотку ротора двигуна з контактними кільцями виконують за тими ж схемами, що і статорні обмотки.

Обмотку, як правило, з'єднують зіркою, а кінці її приєднують до контактних кілець. Пази ротора в цьому випадку роблять напівзакритими.

Підшипникові щити двигуна служать опорою для підшипників. Щити кріплять болтами до корпусу статора і, так само як і корпус, роблять литими чи зварними.

В асинхронних машинах малої потужності корпус і підшипникові щити часто відливають з алюмінієвого сплаву, що полегшує вагу двигуна і зменшує його вартість. На корпус статора встановлюють коробку виводів із шістьма виводами обмотки статора. Виводи обмотки ротора позначають $P1$, $P2$, $P3$.

На корпусі двигуна закріплена табличка, на якій зазначені: тип двигуна, завод-виготовлювач, рік випуску, а також номінальні дані двигуна: корисна потужність, напруги, на які двигун може бути включений, величина струму, коефіцієнт потужності, швидкість обертання і ККД.

5.2 РОБОЧИЙ ПРОЦЕС АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

5.2.1 Електрорушійні сили в обмотках асинхронного двигуна

Як впливає з принципу роботи асинхронного двигуна, обмотка ротора не має електричного зв'язку з обмоткою статора. Між цими обмотками існує тільки магнітний зв'язок, і енергія з однієї обмотки передається в іншу за

допомогою магнітного поля. У цьому відношенні асинхронний двигун подібний трансформатору, у якому обмотка статора є первинною, а обмотка ротора — вторинною.

У процесі роботи асинхронного двигуна струми в обмотках статора і ротора створюють у машині дві намагнічуючі сили: НС статора і НС ротора. Спільною дією цих НС у двигуні створюється результуючий магнітний потік, що обертається відносно статора із синхронною швидкістю n_1 . Так само, як і в трансформаторі, цей магнітний потік можна розглядати таким, що складається з основного потоку Φ , зчепленого як з обмоткою статора, так і з обмоткою ротора, і двох потоків розсіювання: потоку розсіювання обмотки статора Φ_{p1} , і потоку розсіювання обмотки ротора Φ_{p2} .

Розглянемо, які ЕРС наводяться в обмотках двигуна.

В обмотці статора. Основний магнітний потік Φ , що обертається зі швидкістю n_1 , наводить у нерухомій обмотці статора ЕРС E_1 , величина якої визначається формулою

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 K_1.$$

Магнітний потік розсіювання статора Φ_{p1} ; наводить в обмотці статора ЕРС розсіювання E_{p1} , величина якої визначається індуктивним спаданням напруги в обмотці статора

$$- \dot{E}_{p1} = j \dot{I}_1 x_1,$$

де x_1 — індуктивний опір розсіювання однієї фази обмотки статора.

Крім того, струм I_1 в обмотці статора створює спадання напруги в активному опорі

$$\dot{E}_r = \dot{I}_1 r_1,$$

де r_1 — активний опір однієї фази обмотки статора. Таким чином, напруга мережі U_1 , що підведена до обмотки статора, врівноважується сумою ЕРС, наведених у цій обмотці

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{p1}) + \dot{E}_r,$$

чи

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j \dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1.$$

Цей вираз являє собою рівняння ЕРС обмотки статора асинхронного двигуна.

В обмотці ротора. У процесі роботи двигуна ротор обертається у бік обертання магнітного поля статора зі швидкістю n_2 . Тому швидкість обертання поля статора щодо ротора дорівнює різниці швидкостей $n_1 - n_2$. Основний магнітний потік Φ обмотки статора, обганяючи ротор зі швидкістю $n_1 - n_2$, індукує в обмотці ротора ЕРС

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \Phi w_2 K_2,$$

де K_2 — обмотковий коефіцієнт обмотки ротора; w_2 — число послідовно з'єднаних витків однієї фази обмотки ротора; f_2 — частота ЕРС E_{2s} .

Частота f_2 визначається швидкістю обертання магнітного поля статора відносно ротора $n_1 - n_2$ і числом пар полюсів обмотки статора

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

Перетворивши вираз, одержимо

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s.$$

Тобто частота ЕРС в обмотці ротора пропорційна ковзанню.

Для більшості асинхронних двигунів ця частота невелика і при $f_1 = 50$ Гц вона не перевищує декількох герців.

$$E_{2s} = 4,44 f_1 s \Phi w_2 K_2 = s E_2.$$

Тут E_2 являє собою ЕРС, наведену в обмотці ротора при ковзанні $s=1$, тобто при нерухомому роторі.

Потік розсіювання ротора Φ_{p2} індукує в обмотці ротора ЕРС розсіювання E_{p2} , величина якої визначається індуктивним спаданням напруги в цій обмотці

$$\dot{E}_{p2} = -j \dot{I}_2 s x_2,$$

де x_2 — індуктивний опір розсіювання обмотки при нерухомому роторі ($s=1$).

Струм I_2 в обмотці ротора створює спадання напруги в активному опорі $\dot{I}_2 r_2$, де r_2 — активний опір обмотки ротора.

Оскільки в процесі роботи двигуна обмотка ротора замкнута накоротко, то сума ЕРС у ланцюзі ротора дорівнює нулю, тобто

$$s \dot{E}_2 - j \dot{I}_2 s x_2 - \dot{I}_2 r_2 = 0.$$

Розділивши всі члени рівності на s , одержимо рівняння ЕРС для кола обмотки ротора

$$\dot{E}_2 - j \dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} = 0.$$

5.2.2 Рівняння намагнічувальних сил і струмів асинхронного двигуна

Основний магнітний потік Φ в асинхронному двигуні створюється спільною дією НС обмоток статора F_1 і ротора F_2

$$\Phi = \frac{F_1 + F_2}{R_m} = \frac{F_o}{R_m},$$

де R_m — магнітний опір магнітної системи двигуна потоку Φ ;

$F_o = F_1 + F_2$ — результуюча НС асинхронного двигуна, що чисельно рівна НС обмотки статора в режимі холостого ходу.

Величина цієї НС визначається за формулою

$$F_o = 0,45m_1 \frac{I_o w_1}{p} K_1,$$

де I_o — струм холостого ходу, тобто струм в обмотці статора в режимі холостого ходу.

НС обмоток статора і ротора в режимі навантаженого двигуна

$$F_1 = 0,45m_1 \frac{I_1 w_1}{p} K_1, \quad F_2 = 0,45m_2 \frac{I_2 w_2}{p} K_2,$$

де m_2 — кількість фаз в обмотці ротора; K_2 — обмотковий коефіцієнт обмотки ротора.

При змінах навантаження на валу двигуна змінюються струми I_1 і I_2 в обмотках, що викликає відповідні зміни НС обмоток статора і ротора. Але основний магнітний потік Φ при цьому зберігається незмінним. Справа в тому, що напруга, підведена до обмотки статора, незмінна ($U_1 = const$) і майже цілком зрівноважується ЕРС E_1 обмотки статора

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1).$$

Але, оскільки ЕРС E_1 пропорційна основному потоку Φ , то останній при змінах навантаження залишається незмінним. Цим і пояснюється те, що, незважаючи на зміни НС F_1 і F_2 , результуюча НС F_o залишається незмінною

$$\dot{F}_o = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 = const.$$

Підставивши замість F_o , F_1 і F_2 їх значення, одержимо

$$0,45m_1 \frac{I_o w_1}{p} K_1 = 0,45m_1 \frac{I_1 w_1}{p} K_1 + 0,45m_2 \frac{I_2 w_2}{p} K_2.$$

Розділивши цю рівність на $m_1 \frac{w_1}{p} K_1$, одержимо рівняння струмів асинхронного двигуна

$$\dot{I}_o = \dot{I}_1 + \frac{m_2 w_2 K_2}{m_1 w_1 K_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2.$$

Величина $\dot{I}'_2 = \frac{m_2 w_2 K_2}{m_1 w_1 K_1} \dot{I}_2$ являє собою струм ротора, приведений до обмотки статора.

Перетворивши рівняння, одержимо вираз струму статора

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_i + (-\dot{I}'_2),$$

з якого випливає, що струм статора асинхронного двигуна має дві складові: I_0 — що намагнічує і $-I'_2$ — складову, котра компенсує розмагнічувальну дію струму ротора.

Отже, струм ротора $-I'_2$ робить на магнітну систему двигуна такий же розмагнічувальний вплив, як і струм вторинної обмотки трансформатора. Цим пояснюється те, що будь-яка зміна навантаження на валу двигуна супроводжується відповідною зміною струму в обмотці статора I_1 . Справа в тому, що зміна навантаження на валу двигуна викликає зміну ковзання s . Це, у свою чергу, впливає на ЕРС обмотки ротора, а отже, і на величину струму ротора I_2 . Але оскільки струм I_2 має розмагнічувальний вплив на магнітний ланцюг двигуна, то його зміни викликають відповідні зміни струму в ланцюзі статора I_1 за рахунок складової $-I'_2$. Так, наприклад, у режимі холостого ходу, коли навантаження на валу двигуна відсутнє і $s \approx 0$, струм $-I'_2 \approx 0$.

У цьому випадку струм в обмотці статора $I_1 \approx I_0$. Якщо ж ротор загальмувати, не відключаючи обмотки статора від мережі (режим короткого замикання), то ковзання $s = 1$ і ЕРС обмотки ротора E_{2s} , досягає свого найбільшого значення E_2 . Також найбільшого значення досягає струм $-I'_2$, а отже, і струм в обмотці статора I_1 .

5.2.3 Приведення параметрів обмотки ротора до обмотки статора

Для того щоб вектори величин обмоток статора і ротора можна було зобразити на одній векторній діаграмі, як це ми робили для трансформаторів, параметри обмотки ротора необхідно привести до обмотки статора. При цьому обмотку ротора з числом фаз m_2 , обмотковим коефіцієнтом K_2 і числом витків фази w_2 замінюють обмоткою з m_1 , K_1 і w_1 . При такій заміні енергетичний баланс у роторі повинний залишитися незмінним, тобто в приведенному роторі потужності і кути фазових зрушень векторів повинні залишитися такими ж, що і до приведення.

Перерахування реальних параметрів обмотки ротора на приведені ведеться по наступним формулах.

Приведена ЕРС ротора при $s = 1$

$$E'_2 = E_2 K_e,$$

де $K_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1 w_1}{K_2 w_2}$ — коефіцієнт трансформації напруги в асинхронній

машині при нерухомому роторі ($s = 1$).

Приведений струм ротора

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{K_i},$$

де $K_i = \frac{m_1 w_1 K_1}{m_2 w_2 K_2} = \frac{m_1}{m_2} K_e$ — коефіцієнт трансформації струму в асинхронній машині.

На відміну від трансформаторів в асинхронних двигунах коефіцієнт трансформації по напрузі K_e і по струму K_i не рівні, тому що в загальному випадку число фаз в обмотці статора m_1 і в обмотці ротора m_2 неоднакові; лише в двигунах з фазним ротором, у яких $m_1 = m_2$ ці коефіцієнти однакові.

Активні й індуктивні приведені опори обмотки ротора

$$r'_2 = r_2 K_e K_i; \quad x'_2 = x_2 K_e K_i.$$

Варто звернути увагу на деяку специфіку визначення числа фаз m_2 і кількості витків w_2 у короткозамкненій обмотці ротора.

Кожен стрижень цієї обмотки можна розглядати як фазну обмотку. Тому кількість витків однієї фази обмотки ротора приймається рівною

$$w_1 = \frac{1}{2},$$

обмотковий коефіцієнт обмотки ротора

$$K = 1,$$

а число фаз m_2 приймається рівним числу стрижнів

$$m_2 = Z_2.$$

5.2.4 Векторна діаграма асинхронного двигуна

Для асинхронного двигуна, як і для трансформатора, може бути побудована векторна діаграма струмів і ЕРС. Діаграма будується на підставі рівнянь ЕРС і струмів. Для зручності побудови запишемо ці рівняння ще раз, при цьому рівняння ЕРС для ланцюга ротора запишемо в приведеному вигляді

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1;$$

$$0 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 \frac{r'_2}{s};$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_i + (-\dot{I}'_2).$$

Величина $\frac{r'_2}{s}$ може бути подана у вигляді

$$\frac{r'_2}{s} = \frac{r'_2}{s} - \frac{r'_2 s}{s} + r'_2 = r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s},$$

тоді рівняння ЕРС для ланцюга ротора приймає вигляд

$$0 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}.$$

Кут зрушення фаз між ЕРС E'_2 і струмом ротора I'_2 визначається по формулі

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 s}{r'_2}.$$

Оскільки векторна діаграма асинхронного двигуна будується по рівняннях ЕРС і струмів, що аналогічні рівнянням трансформатора, то порядок побудови цієї діаграми такий же, що і векторної діаграми трансформатора.

На рис. 5.2.1 представлена векторна діаграма асинхронного двигуна. Від векторної діаграми трансформатора вона відрізняється лише тим, що сума спадань напруги в обмотці ротора (у вторинній обмотці) врівноважується ЕРС E'_2 обмотки ротора при $n_2=0$. Пояснюється це тим, що обмотка ротора замкнута накоротко, а не на навантаження, як це має місце у вторинній обмотці трансформатора.

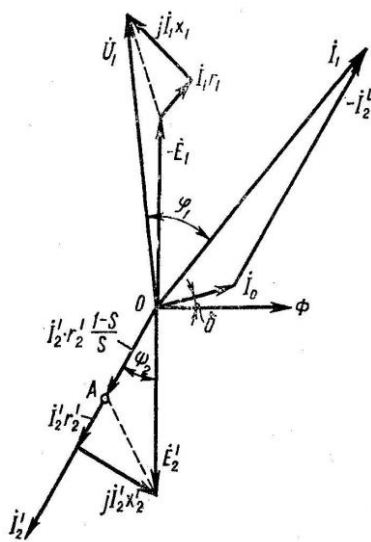


Рис. 5.2.1

Однак, якщо спадання напруги $I'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}$ розглядати як напругу на деякому навантаженні $r'_2 \frac{1-s}{s}$, що підключено на затиски обмотки ротора, то векторну діаграму асинхронного двигуна можна розглядати як векторну діаграму трансформатора, на затиски вторинної обмотки якого включений змінний опір $r'_2 \frac{1-s}{s}$. Інакше кажучи, асинхронний двигун в електричному відношенні подібний трансформатору, що працює на активне навантаження $r'_2 \frac{1-s}{s}$. Потужність вторинної

обмотки такого трансформатора

$$P'_2 = m_1 I'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}$$

являє собою *повну механічну потужність*, що розвивається асинхронним двигуном.

5.2.5 Схема заміщення асинхронного двигуна

Рівнянням ЕРС і струмів, а також векторної діаграми асинхронного двигуна (рис. 5.2.1) відповідає електрична схема (рис. 5.2.2, а), що називається схемою заміщення асинхронного двигуна.

Таким чином, асинхронна машина з електромагнітним зв'язком статорного і роторного ланцюгів замінена еквівалентною електричною схемою. Активний опір $r'_2 \frac{1-s}{s}$ можна розглядати як зовнішній опір,

включений в обмотку нерухомого ротора. У цьому випадку асинхронна машина працює як трансформатор, що має активне навантаження. Опір $r'_2 \frac{1-s}{s}$ є єдиним змінним параметром схеми.

Величина цього опору визначається ковзанням, а отже, механічним навантаженням на валу асинхронного двигуна. Так, наприклад, якщо навантажувальний момент на валу двигуна $M_2=0$, то ковзання $s \approx 0$. При

цьому величина $r'_2 \frac{1-s}{s} = \infty$, що

відповідає роботі двигуна в режимі холостого ходу. Якщо ж навантажувальний момент на валу двигуна перевищує його обертаючий момент, то ротор двигуна зупиняється ($s=1$). При

цьому величина $r'_2 \frac{1-s}{s} = 0$, що

відповідає режиму короткого замикання асинхронного двигуна.

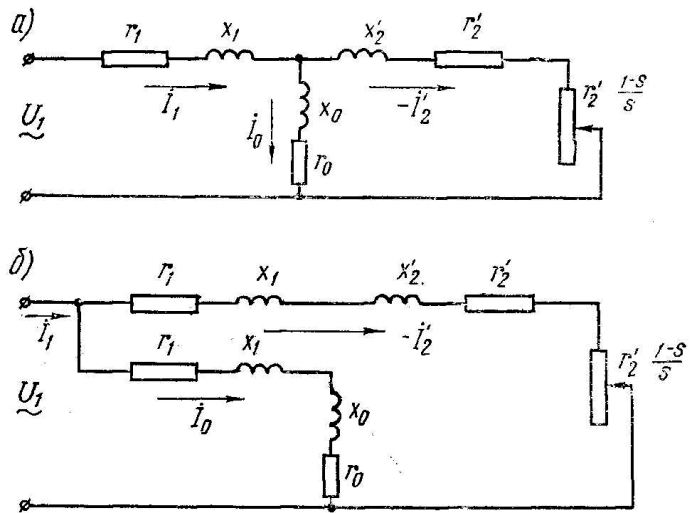


Рис. 5.2.2

Отримана схема заміщення

асинхронного двигуна може бути перетворена в більш простий вигляд. З цією метою контур, що намагнічує, $Z_o=r_o+jx_o$ виносять на загальні затиски. Щоб при цьому струм, що намагнічує, не змінив своєї величини, послідовно включають опори r_1 і x_1 (рис. 5.2,2 б). В отриманій схемі заміщення опори контурів статора і ротора з'єднані послідовно; вони утворюють робочий контур, паралельно якому включений контур, що намагнічує. Величина струму в робочому контурі

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}},$$

чи,

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}},$$

де U_1 — фазна напруга, підведена до обмотки статора.

5.3. РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

5.3.1. Втрати і коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна

Перетворення енергії в асинхронному двигуні, як і в інших електричних машинах, зв'язано з втратами енергії. Ці втрати поділяються на механічні, магнітні й електричні.

З мережі в обмотку статора надходить потужність P_1 . Частина цієї потужності витрачається на покриття *магнітних втрат* у сердечнику статора p_{c1} , а також в обмотці статора на покриття *електричних втрат*, обумовлених нагріванням обмотки,

$$p_{e1} = m_1 I_1^2 r_1.$$

Частина потужності, що залишилася, за допомогою магнітного потоку передається на ротор і тому *називається електромагнітною потужністю*

$$P_{em} = P_1 - (p_{c1} + p_{e1}).$$

Частина електромагнітної потужності затрачається на покриття *електричних втрат в обмотці ротора*

$$p_{e2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'.$$

Інша частина електромагнітної потужності перетвориться в механічну потужність двигуна, називану *повною механічною потужністю*

$$P_2' = P_{em} - p_{e2}.$$

Можна записати наступний вираз повної механічної потужності

$$P_2' = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = p_{e2} \frac{1-s}{s}.$$

Тоді

$$p_{e2} \frac{1-s}{s} = P_{em} - p_{e2}.$$

Перетворивши це рівняння, одержимо

$$p_{e2} = s P_{em},$$

тобто *потужність електричних втрат у роторі пропорційна ковзанню*. Тому робота асинхронного двигуна більш економічна при малих ковзаннях.

Слід зазначити, що в роторі двигуна виникають також і магнітні втрати, але через невелику частоту струму ротора ($f_2 = f_1 s$) ці втрати настільки малі, що ними звичайно зневажають.

Механічна потужність на валу двигуна P_2 менше повної механічної потужності P_2' на величину *механічних* p_{mex} і *додаткових* p_δ втрат

$$P_2 = P_2' - (p_{mex} + p_\delta).$$

Механічні втрати в асинхронному двигуні обумовлені тертям у підшипниках і тертям обертових частин об повітря. Додаткові втрати викликані наявністю в двигуні полів розсіювання і пульсацією поля в зубцях ротора і статора.

Таким чином, корисна потужність асинхронного двигуна

$$P_2 = P_1 - \sum p,$$

де $\sum p$ — сума втрат в асинхронному двигуні,

$$\sum p = p_{c1} + p_{e1} + p_{e2} + p_{\text{мех}} + p_{\delta}.$$

Коефіцієнт корисної дії його асинхронного двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1}.$$

Завдяки відсутності колектора ККД асинхронних двигунів вище, ніж у двигунів постійного струму. Залежно від величини потужності асинхронних двигунів їх ККД при номінальному навантаженні може бути в межах від 83 до 95% (верхня межа відповідає двигунам великої потужності).

5.3.2. Електромагнітний момент асинхронного двигуна

Електромагнітний момент асинхронного двигуна створюється взаємодією струму в обмотці ротора з обертовим магнітним полем. Електромагнітний момент M пропорційний електромагнітній потужності

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{\omega_1},$$

де $\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$ кутова швидкість обертання магнітного поля статора.

Оскільки синхронна швидкість $n_1 = \frac{f_1 60}{p}$, то

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1 60}{60p} = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

Підставивши значення електромагнітної потужності одержимо

$$M = \frac{P_{e2}}{\omega_1 s} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{\omega_1 s},$$

тобто електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний потужності електричних втрат в обмотці ротора.

Підставляючи у формулу значення струму I'_2 , а також значення $\omega_1 = \frac{2\pi f}{p}$

, одержимо

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]} [H \cdot m].$$

Вираз моменту дає можливість побудувати графік залежності електромагнітного моменту двигуна від ковзання $M=f(s)$, названого *механічною характеристикою* двигуна (рис. 5.2.3).

При побудові механічної характеристики двигуна виходять з положення, що усі величини, що входять у формулу, за винятком ковзання s , є постійними, тому що величини m_1 , r_1 , r'_2 , x_1 і x'_2 задаються конструкцією двигуна, а f_1 і U_1 є незмінними параметрами мережі, що живить двигун.

У момент пуску двигуна в хід $n_2=0$ і $s=l$. Розвивається при цьому *пусковий момент*

$$M_n = \frac{m_1 p U_1^2 r'_2}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2]}.$$

Під дією моменту M_n ротор двигуна приводиться в обертання, при цьому ковзання зменшується, а момент збільшується. При ковзанні s_k момент досягає максимального значення.

Величину *критичного* ковзання s_k що відповідає максимальному моменту, можна знайти, узявши

похідну від виразу моменту по s і дорівнявши її нулю, $\frac{dM}{ds} = 0$. Звідси одержуємо шукане значення

$$s_k = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}.$$

Тут знак «плюс» відповідає роботі асинхронної машини в режимі двигуна.

Зневажаючи величиною опору r_1 , що, як правило, не перевищує 10-12% від $(x_1 + x'_2)$, одержимо більш простий вираз критичного ковзання

$$s_k \approx \pm \frac{r'_2}{x_1 + x'_2}.$$

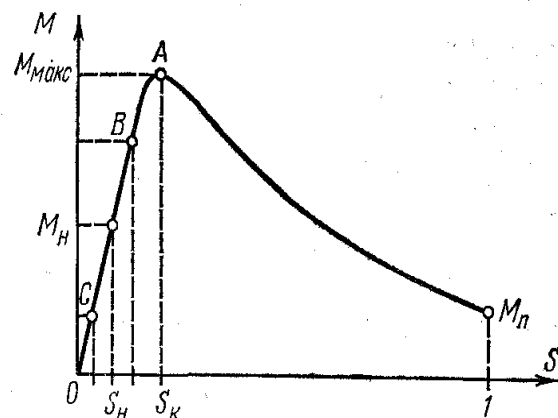


Рис. 5.2.3

Підставивши значення критичного ковзання, одержимо формулу максимального електромагнітного моменту асинхронного двигуна

$$M_{\max} = \frac{m_1 p_1 U_1^2}{4\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}$$

Повернемося до аналізу механічної характеристики $M=f(s)$. Після досягнення моментом значення M_{\max} швидкість обертання ротора продовжує збільшуватися, а момент починає зменшуватися. Так буде продовжуватися доти, поки електромагнітний момент не стане рівним сумі протидіючих моментів

$$M = M_o + M_2 = M_{cm},$$

де M_o — момент холостого ходу; M_2 — корисний навантажувальний момент, тобто момент на валу двигуна.

Допустимо, що протидіючий момент на валу M_2 відповідає номінальному навантаженню двигуна.

У цьому випадку сталий режим роботи двигуна визначиться точкою на механічній характеристиці з координатами $M=M_n$ і $s=s_n$, де M_n і s_n — номінальні значення електромагнітного моменту і ковзання.

З аналізу механічної характеристики також впливає, що стала робота асинхронного двигуна можлива при ковзаннях $s < s_k$ тобто на ділянці OA механічної характеристики. Справа в тім, що на цій ділянці зміна навантаження на валу двигуна супроводжується відповідною зміною електромагнітного моменту. Так, наприклад, якщо двигун працював у номінальному режимі (M_n, s_n) і відбулося збільшення навантажувального моменту M_2 на валу двигуна, то рівність моментів порушиться

$$M_n < M_o + M_2$$

і швидкість обертання ротора почне спадати (ковзання буде збільшуватися). Але це приведе до росту електромагнітного моменту. Момент M буде збільшуватися доти, поки він не стане рівним сумі протидіючих моментів. Після чого режим роботи двигуна знову стане сталим, хоча і буде відповідати іншим значенням моменту і ковзання (точка B на рис. 5.11).

При зменшенні навантажувального моменту на валу щодо його номінального значення M_n

$$M_n > M_o + M_2$$

швидкість ротора почне збільшуватися (ковзання зменшуватися).

Це викликає зменшення електромагнітного моменту до значення, рівного сумі протидіючих моментів, і сталий режим роботи двигуна буде відновлений, але вже при інших значеннях моменту і ковзання (точка C).

Робота асинхронного двигуна стає нестійкою при ковзаннях $s \geq s_k$. Так, якщо електромагнітний момент двигуна $M=M_{\max}$ а ковзання $s=s_k$, то навіть

незначне збільшення навантажувального моменту M_2 викликає збільшення s , а отже, зменшення електромагнітного моменту. Це приведе до подальшого збільшення ковзання тощо.

Так буде продовжуватися доти, поки ковзання s не стане рівним одиниці, тобто поки ротор двигуна не зупиниться.

Таким чином, при досягненні електромагнітного моменту максимального значення настає край сталої роботи двигуна. Отже, для сталої роботи асинхронного двигуна необхідно, щоб номінальний момент був менше максимального. У цьому випадку двигун буде працювати стійко не тільки при номінальному навантаженні, але буде здатен витримувати деякі перевантаження, що необхідно для надійної роботи двигуна в електроприводі. Іншими словами, двигун повинний мати *перевантажувальну здатність*, що визначається відношенням максимального моменту M_{\max} до номінального M_n . Для асинхронних двигунів загального застосування

$$\frac{M_{\max}}{M_n} = 1,7 - 2,5.$$

Варто також звернути увагу на те, що робота двигуна при ковзаннях $s < s_k$, тобто на робочій ділянці механічної характеристики, є найбільш економічною, тому що вона відповідає малим значенням ковзання, а отже, і меншим значенням електричних втрат в обмотці ротора $P_{e2} = sP_{em}$.

Іноді електромагнітний момент виражають у відносних одиницях, як відношення заданого значення моменту M до його номінального значення M_n .

У цьому випадку механічна характеристика являє собою залежність $\frac{M}{M_n} = f(s)$, а номінальне значення моменту на ній визначається одиницею на осі ординат.

5.3.3. Робочі характеристики асинхронного двигуна

Робочі характеристики асинхронного двигуна являють собою залежності швидкості обертання n_2 , коефіцієнта корисної дії η , корисного моменту M_2 , коефіцієнта потужності $\cos\phi$ і величини струму I_1 від корисної потужності P_2 при $U_1 = \text{const}$ і $f_1 = \text{const}$.

На рис. 5.2.4 представлені робочі характеристики асинхронного двигуна. Розглянемо деякі з них.

Швидкісна характеристика $n_2 = f(P_2)$. З формули ковзання випливає, що $n_2 = n_1(1-s)$. Але в той же час,

$$s = \frac{P_{e2}}{P_{em}},$$

тобто ковзання двигуна, а отже, його швидкість обертання визначається відношенням електричних втрат у роторі до електромагнітної потужності $P_{ем}$.

Зневажаючи втратами холостого ходу, можна прийняти, що при роботі двигуна без навантаження $p_{e2} \approx 0$, тому $s \approx 0$ і $n_2 \approx n_1$. В міру збільшення навантаження ковзання росте, досягаючи значень 0,01—0,06 при номінальному навантаженні. Відповідно до цього залежність $n_2 = f(P_2)$ являє собою криву, слабо нахилену до осі абсцис.

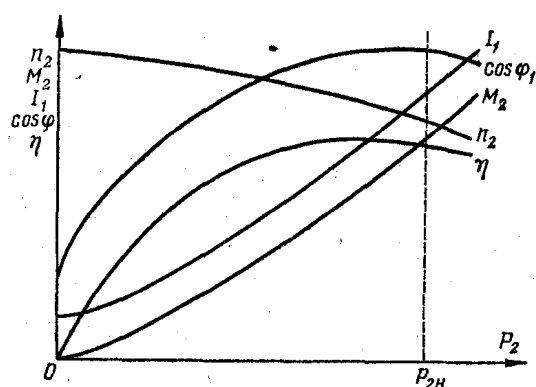


Рис. 5.2.4

Однак при збільшенні активного опору ротора r_2' кут нахилу цієї кривої збільшується, тобто зміни швидкості обертання ротора n_2 при коливаннях навантаження P_2 зростають. Пояснюється це тим, що зі збільшенням r_2' електричні втрати в роторі p_{r2} збільшуються.

Залежність $M_2 = f(P_2)$. Залежність корисного моменту на валу двигуна від потужності P_2 визначається формулою

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{60P_2}{2\pi n_2} = 9,55 \frac{P_2}{n_2} [\text{Н} \cdot \text{м}],$$

де P_2 – корисна потужність двигуна, Вт.

Якби $n_2 = \text{const}$, то графік $M_2 = f(P_2)$ мав вигляд прямої. Але в асинхронному двигуні зі збільшенням P_2 швидкість обертання зменшується, а тому корисний момент M_2 зі збільшенням навантаження зросте трохи швидше, ніж P_2 , і, отже, графік $M_2 = f(P_2)$ має криволінійний вигляд.

Залежність $\cos \phi_1 = f(P_2)$. У зв'язку з тим, що в асинхронному двигуні струм статора I_1 має реактивну (індуктивну) складову, необхідну для створення магнітного поля статора, коефіцієнт потужності асинхронних двигунів менше одиниці. Найменше значення коефіцієнта потужності відповідає режиму холостого ходу. Пояснюється це тим, що величина струму холостого ходу I_0 при будь-якому навантаженні залишається практично незмінною. При малих навантаженнях двигуна, коли приведений струм ротора I_2' невеликий, струм статора $I_1 = I_0 + (-I_2')$ є в значній частині реактивним і тому він зрушений по фазі відносно напруги U_1 на кут ϕ_1 , що лише дещо менше 90° . Коефіцієнт потужності асинхронних двигунів у режимі холостого ходу, як правило, не перевищує 0,2. При збільшенні навантаження на вал двигуна росте активна складова струму I_1 . У цьому випадку коефіцієнт потужності зростає, досягаючи найбільшої величини (0,80—0,90) при навантаженні, близькому до номінального.

Подальше збільшення навантаження супроводжується зменшенням $\cos \phi_1$, що пояснюється збільшенням індуктивного опору ротора (x_2s) за рахунок

збільшення ковзання. З метою підвищення коефіцієнта потужності асинхронних двигунів надзвичайно важливо, щоб двигун працював завжди, чи принаймні, значну частину часу з номінальним навантаженням. Це можна забезпечити лише при правильному виборі потужності двигунів. Якщо ж двигун значну частину часу працює недовантаженим, то для підвищення $\cos\varphi_1$ доцільно підвезену до двигуна напругу U_1 зменшити.

Робочі характеристики двигунів малої потужності можна зняти методом безпосереднього навантаження за допомогою якого-небудь гальма, що дозволяє виміряти створюваний ним навантажувальний момент. Для двигунів середньої і великої потужності робочі характеристики визначають за допомогою кругової діаграми, побудованої для даного двигуна по його розрахункових чи досліджених даних.

5.3.4. Режими роботи асинхронних машин

Якщо ротор асинхронної машини, включеної в мережу з напругою U_1 , обертає за допомогою первинного двигуна в напрямку обертового поля статора, але зі швидкістю $n_2 > n_1$, то рух ротора відносно поля статора зміниться (у порівнянні з режимом двигуна цієї машини), оскільки ротор буде обганяти поле статора.

При цьому ковзання стане негативним, а напрямок ЕРС E_1 , наведеної в обмотці статора, а отже, і напрямок струму I_1 зміняться на протилежний. У результаті електромагнітний момент на роторі також змінить напрямок і з обертаючого (у режимі двигуна) перетвориться в протидіючий (стосовно обертаючого моменту первинного двигуна). У цих умовах асинхронна машина з режиму двигуна перейде в *генераторний режим*, перетворюючи механічну енергію первинного двигуна в електричну.

При генераторному режимі асинхронної машини ковзання може змінюватися у діапазоні

$$-\infty < s < 0,$$

при цьому частота ЕРС асинхронного генератора (АГ) залишається незмінною, тому що вона визначається швидкістю обертання поля статора, тобто залишається такою ж, як і частота струму в мережі, на яку включений асинхронний генератор.

Через те, що в генераторному режимі асинхронної машини умови створення обертового поля статора такі ж, як у режимі двигуна (і в тому і в іншому режимах обмотка статора включена в мережу з напругою U_1), і споживає з мережі намагнічуючий струм, I_0 , то асинхронна машина в генераторному режимі має особливі властивості: вона споживає реактивну енергію з мережі, необхідну для створення обертового поля статора, але віддає в мережу активну енергію, отриману в результаті перетворення механічної енергії первинного двигуна. Варто звернути увагу, що робота асинхронних генераторів можлива лише при їхній спільній роботі із синхронними генераторами, що у цьому випадку необхідні як джерела реактивної енергії.

На відміну від синхронних асинхронні генератори не піддані небезпекам випадання із синхронізму. Однак асинхронні генератори не одержали широкого поширення, що пояснюється рядом їхніх недоліків у порівнянні із синхронними генераторами.

Одним з істотних недоліків асинхронних генераторів є значна реактивна потужність, що споживається ними з мережі. Величина цієї потужності пропорційна намагнічувальному струму I_0 і може досягати 25-45% від номінальної потужності машини.

З цього випливає, що для роботи 3—4 асинхронних генераторів необхідно використовувати один синхронний генератор такої ж потужності, що і потужність одного асинхронного генератора.

Якщо ж асинхронні генератори працюють паралельно на загальну мережу з декількома синхронними генераторами, то велика величина реактивної потужності збудження асинхронних генераторів значно понизить коефіцієнт потужності всієї електричної мережі.

Асинхронний генератор може працювати й в автономних умовах, тобто без включення в загальну мережу. Але в цьому випадку для одержання реактивної потужності, що необхідна для намагнічування генератора, використовується батарея конденсаторів, включених паралельно навантаженню на виводи генератора. Невід'ємною умовою такої роботи асинхронних генераторів є наявність залишкового намагнічування сталі ротора, що необхідно для процесу самозбудження генератора. Невелика ЕРС $E_{зал}$, що наведена в обмотці статора, створює в ланцюзі конденсаторів (рис. 5.2.5), а отже, і в обмотці статора невеликий реактивний струм, що підсилює залишковий потік $\Phi_{зал}$. Надалі процес самозбудження розвивається, як і в генераторі постійного струму паралельного збудження. Зміною ємності конденсаторів можна змінювати величину струму, що намагнічує, а отже, і величину напруги генераторів.

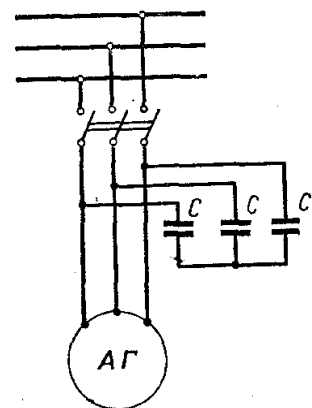


Рис. 5.2.5

Асинхронні генератори застосовуються лише на електростанціях допоміжного значення малої потужності, наприклад у вітросилових установках.

Гальмовий режим асинхронної машини застосовується при необхідності швидкої зупинки ротора двигуна. Цей режим створюється противключенням двигуна. Для цього необхідно змінити напрямок обертання магнітного поля статора. З цією метою досить переключити будь-яку пару проводів, що з'єднують обмотку статора з мережею, тобто змінити порядок проходження фаз на затискачах статора (рис. 5.2.6).

У перший момент після переключення сполучних проводів сили інерції обертаних частин двигуна і виконавчого механізму продовжують обертати ротор у колишньому напрямку, а обертове поле статора починає обертатися в протилежному напрямку. У цих умовах ковзання асинхронної машини стає більше одиниці

$$s = \frac{-n_1 - n_2}{-n_1} > 1,$$

а електричні втрати в ланцюзі ротора $p_{e2} = sP_{em}$ більше електромагнітної потужності.

Таким чином, електромагнітна потужність машини в гальмовому режимі складає лише частину електричних втрат у роторі. Інша частина цих втрат покривається за рахунок механічної потужності обертючих по інерції частин двигуна і виконавчого механізму.

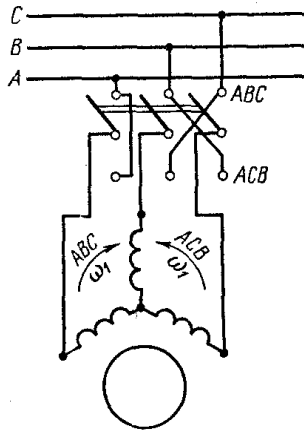


Рис. 5.2.6

Електромагнітний момент при цьому має той же напрямок, що і напрямок поля статора, тобто напрямок проти обертання ротора і є гальмуючим стосовно моменту, що обертає ротор. До недоліків цього способу гальмування варто віднести: значні втрати енергії, викликані нагріванням роторної обмотки, а також великі кидки струму в момент переключення проводів обмотки статора. У двигунах з контактними кільцями для обмеження кидка струму при гальмуванні протиключенням у ланцюг ротора включають опір. Крім того, при гальмуванні двигуна зазначеним способом необхідно відключити його від мережі в момент зупинки, тому що в протилежному випадку відбудеться реверсування,

тобто ротор двигуна почне обертатися в протилежному напрямку.

Таким чином, можливі три режими роботи асинхронної машини: режим двигуна, генераторний і гальмовий.

Кожному з зазначених режимів відповідає визначений діапазон зміни ковзання: у режимі двигуна ковзання може змінюватися від нуля ($n_2 = n_1$) до

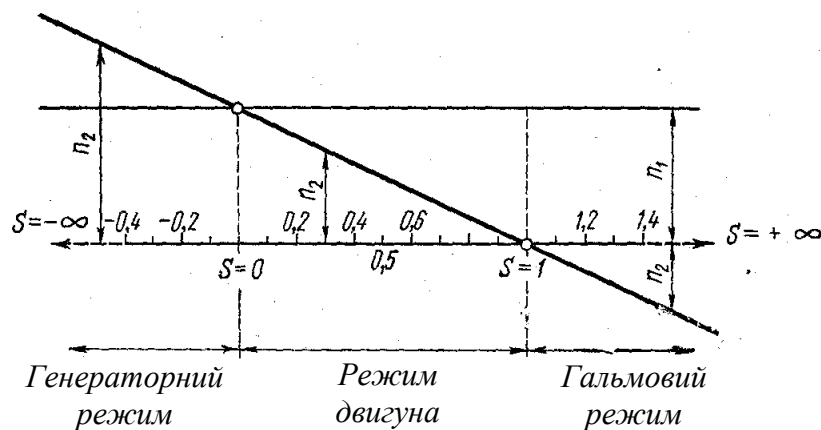


Рис. 5.2.7

одиниці ($n_2 = 0$), у генераторному режимі — від нуля до $-\infty$, а в гальмовому режимі — від одиниці до $+\infty$ (рис. 5.2.7).

5.4 ПУСК У ХІД ТА РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

5.4.1 Пуск у хід асинхронного двигуна

Пускові властивості двигуна

Пускові властивості асинхронного двигуна оцінюються його пусковими характеристиками:

- а) величиною пускового струму I_n чи його кратністю $I_n/I_{1н}$;
- б) величиною пускового моменту M_n чи його кратністю M_n/M_n ;
- в) тривалістю і плавністю пуску двигуна в хід;
- г) складністю пускової операції;
- д) економічністю пускової операції (вартість і надійність пускової апаратури).

У початковий момент пуску ковзання $s=l$, тому, зневажаючи струмом холостого ходу, величину пускового струму I_n можна визначити з формули, підставивши в неї значення $s=1$,

$$I'_n = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}.$$

З виразу випливає, що поліпшити пускові властивості двигуна можна шляхом збільшення активного опору ланцюга ротора r'_2 , тому що в цьому випадку зменшується пусковий струм і збільшується пусковий момент. У той же час напруга U_1 по-різному впливає на пускові характеристики: зі зменшенням U_1 пусковий струм зменшується, що сприятливо впливає на пускові властивості двигуна, але одночасно це викликає зменшення пускового моменту. Можливість застосування того чи іншого способу поліпшення пускових характеристик визначається умовами експлуатації двигуна і вимогами, що до нього пред'являються.

Пуск у хід двигуна з контактними кільцями

У двигунах з контактними кільцями можливе включення в ланцюг ротора пускового реостата r_δ , збільшивши тим самим активний опір ланцюга ротора. При цьому вдається не тільки знизити величину пускового струму, але і збільшити пусковий момент двигуна. Підставивши у формулу

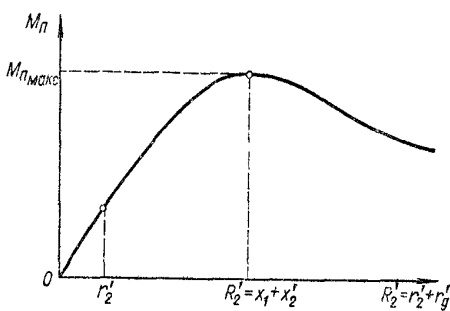


Рис. 5.4.1

пускового моменту замість r'_2 загальний активний опір ланцюга ротора $R'_2 = r'_2 + r_\delta$ і задаючись різними значеннями r'_δ , одержимо залежність пускового моменту від активного опору ланцюга ротора $M_n = f(r'_2 + r_\delta)$ (рис. 5.4.1). Найбільший пусковий момент двигуна відповідає активному опору ланцюга ротора $r'_2 + r_\delta = x_1 + x'_2$.

При виборі пускового опору r'_δ виходять з величини навантажувального моменту. Так,

при значному навантажувальному моменті величина r'_δ повинна бути такою, щоб забезпечити найбільшу величину пускового моменту. При малих навантажувальних моментах, коли величина пускового моменту не має вирішального значення для пуску, виявляється доцільним величину опору r'_δ вибирати трохи більше тієї, котра відповідає найбільшому пусковому моменту. У цьому випадку пусковий момент стає трохи менше найбільшого, але зате величина пускового струму значно зменшується.

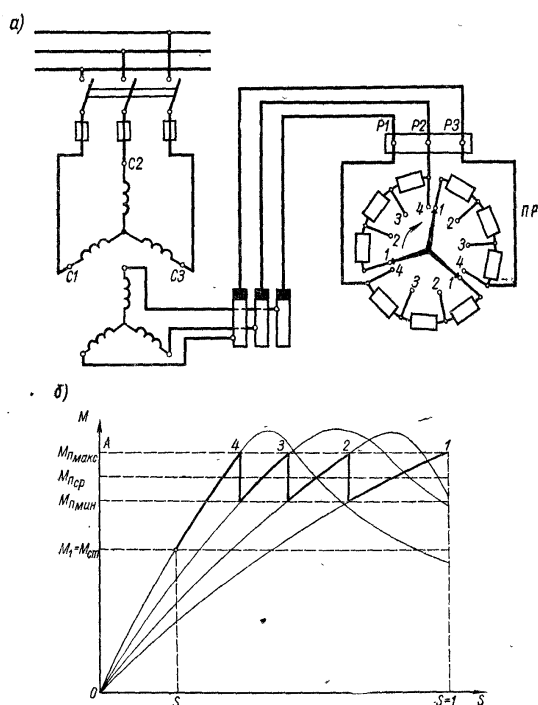


Рис. 5.4.2

величина моменту стане рівною $M_{n\text{мін}}$, важіль реостата пересувають на другий ступінь, що відповідає меншому опору реостата. У цьому випадку залежність $M=f(s)$ виражається кривою 2, і пусковий момент двигуна збільшується до значення $M_{n\text{макс}}$. Так само переключать важіль реостата на третій, а потім і на четвертий ступінь, при якому процес пуску закінчується, і обертаючий момент досягає значення, що дорівнює протидіючому моменту $M_{ст}$.

Таким чином, протягом усього процесу пуску величина пускового моменту залишається приблизно незмінною, що дорівнює середньому значенню $M_{n\text{ср}}$. При цьому пусковий струм має порівняно невелике значення, перевищуючи номінальний струм двигуна лише в півтора-два рази.

Пускові реостати виготовляються з металевого дроту чи стрічки, намотаних у вигляді спіралі, чи з чавунного лиття. Вони можуть мати повітряне чи масляне охолодження. В останніх спіралі поміщені в бак, що наповнений маслом.

На рис. 5.4.2, а показана схема включення пускового реостата PP у ланцюг двигуна з контактними кільцями.

Ступені пускового реостата переключаются таким чином, щоб струм ротора в процесі пуску двигуна в хід залишався приблизно незмінним, а середнє значення пускового моменту було близьке до найбільшого.

На рис. 5.4.2, б представлений графік зміни пускового моменту двигуна при чотирьох ступенях пускового реостата. Так, у початковий момент пуску (перша ступінь) пусковий момент M_n дорівнює OA . В міру розгону двигуна його момент зменшується по кривій 1. Як тільки

Варто мати на увазі, що пускові реостати розраховані на короткочасне протікання струму, а тому важіль реостата не можна довго затримувати на проміжних ступінях, тому що опори реостата можуть перегоріти. Після того як процес пуску закінчений і опори реостата відключені, двигун працює з короткозамкнутою обмоткою ротора. Для запобігання зносу щіток, а також зменшення втрат на тертя, асинхронні двигуни з контактними кільцями часто забезпечуються спеціальним механізмом, що по закінченні процесу пуску дозволяє підняти щітки, попередньо замкнувши накоротко кільця. Замикання кілець двигуна здійснюється поворотом рукоятки, укріпленої на одному з підшипникових щитів двигуна (рис. 5.4.3). Цією ж рукояткою піднімаються щітки. Однак застосування зазначеного механізму ускладнює конструкцію двигуна. Тому він застосовується тільки в двигунах середньої і великої потужності. Двигуни малої потужності звичайно працюють з постійно прилягаючими щітками.

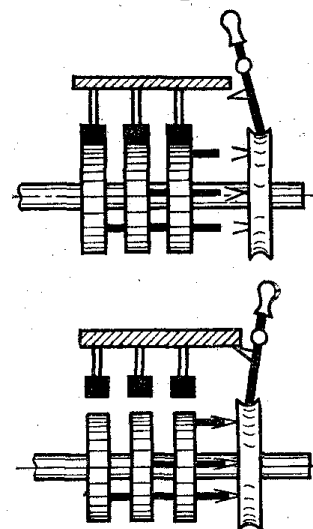


Рис. 5.4.3

На закінчення відзначимо, що в асинхронних двигунах з контактними кільцями забезпечується найбільш сприятливе співвідношення між пусковим моментом і пусковим струмом: значний пусковий момент при невеликому пусковому струмі, що найбільш важливо при пуску в хід двигуна зі значним навантаженням на валу. Однак варто пам'ятати і про деякі недоліки пускових властивостей цих двигунів: складність, тривалість і неекономічність пускової операції.

Пуск у хід двигуна з короткозамкнутим ротором

Пуск безпосереднім включенням у мережу (рис. 5.4.4). Цей спосіб пуску відрізняється від інших своєю простотою. Однак у момент підключення

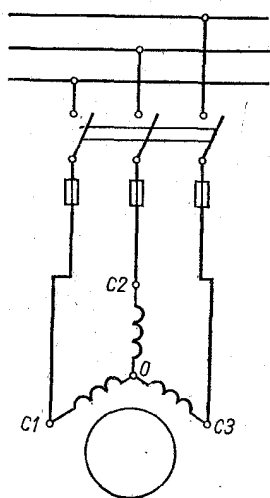


Рис. 5.4.4

двигуна до мережі в ланцюзі статора виникає великий пусковий струм, у п'ять-сім разів перевищуючий номінальний струм двигуна. При малій інерції виконавчого механізму швидкість двигуна дуже швидко зростає до встановленого значення, і струм спадає, досягаючи величини, що відповідає навантаженню двигуна. У цих умовах великий пусковий струм не представляє небезпеки для двигуна, оскільки він швидко спадає і не може викликати перегріву обмоток машин. Але значний кидок струму в ланцюзі двигуна впливає на живильну мережу і при недостатній потужності останньої цей вплив може виразитися в помітних коливаннях напруги мережі. Однак при сучасних

потужних енергетичних системах і мережах двигуни з короткозамкнутим ротором, як правило, запускаються безпосереднім включенням у мережу на повну напругу.

При необхідності зменшення пускового струму застосовують який-небудь зі способів пуску при зниженій напрузі.

Пуск у хід при зниженій напрузі. Пусковий струм двигуна пропорційний напрузі U_1 , тому зменшення напруги U_1 супроводжується відповідним зменшенням пускового струму.

Є кілька способів зниження напруги U_1 у момент пуску. Для асинхронних двигунів, що працюють при з'єднанні обмотки статора трикутником, тобто в якій фазна напруга дорівнює напрузі мережі, може бути застосований пуск у хід *переключенням обмотки статора з зірки на трикутник* (рис. 5.4.5). У момент підключення двигуна до мережі перемикач встановлюють у положення «зірка», при якому обмотка статора виявляється з'єднаною зіркою.

У цьому випадку фазна напруга на статорі знижується в $\sqrt{3}$ разів.

У стільки ж зменшується і струм у фазних обмотках двигуна. Крім того, при з'єднанні обмоток зіркою лінійний струм дорівнює фазному, у той час як при з'єднанні трикутником він більше фазного в $\sqrt{3}$ разів. Отже, застосування способу пуску в хід переключенням статорної обмотки з зірки на трикутник дає зменшення пускового (лінійного) струму в три рази в порівнянні з пусковим струмом при безпосередньому підключенні двигуна до мережі. Після того як ротор двигуна розженеться до швидкості, близької до номінальної, перемикач швидко

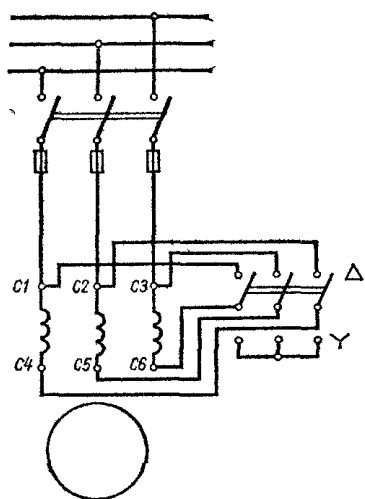


Рис. 5.4.5

переводять у положення «трикутник». Виниклий при цьому струм звичайно невеликий і не впливає на роботу мережі. Однак описаний спосіб пуску має серйозний недолік. Справа в тому, що зменшення фазної напруги в $\sqrt{3}$ разів при пуску спричиняє зменшення пускового моменту в $(\sqrt{3})^2=3$ рази, тому що, пусковий момент двигуна прямо пропорційний квадрату напруги. Таке значне зменшення пускового моменту обмежує застосування цього способу пуску для двигунів, що включаються під навантаженням на валу.

Зниження напруги U_1 при пуску в хід асинхронного двигуна може бути досягнуте також за допомогою реакторів чи

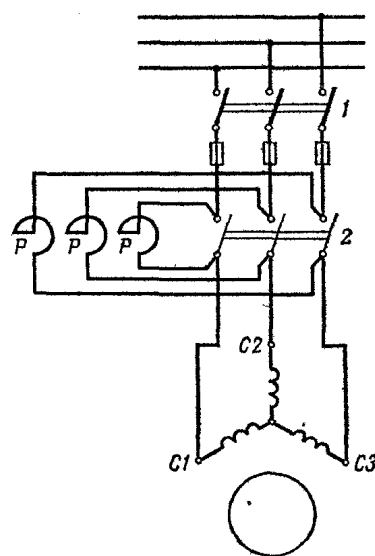


Рис. 5.4.6

автотрансформаторів. Схема пуску асинхронного двигуна за допомогою реакторів (реактивних опорів) зображена на рис. 5.4.6. Порядок включення наступний. При розімкненому рубильнику 2 включають рубильник 1. Струм з мережі надходить в обмотку статора через реактори P , у яких відбувається спадання напруги $j_1 x_p$. У результаті на виводи статорної обмотки двигуна підводиться знижена напруга $U'_1 = U_1 - j_1 x_p$. Після того як ротор двигуна розженеться і пусковий струм спаде, включають рубильник 2, і двигун виявляється під повною напругою мережі $U_{1н}$.

Недолік цього способу пуску полягає в тому, що зменшення напруги в $U'_1/U_{1н}$ разів супроводжується зменшенням початкового пускового моменту M_n двигуна в $(U'_1/U_{1н})^2$ разів. Необхідний опір реактора визначається за формулою

$$x_p = \frac{U_{1н}(1 - K_p)}{K_p I_n},$$

де $U_{1н}$ — номінальна (фазна) напруга статорної обмотки; $K_p = I'_n/I_n$ — відношення пускового струму статора I'_n при пуску двигуна через реактор до пускового струму двигуна I_n при пуску безпосереднім включенням у мережу; звичайно $K_p = 0,65$.

При автотрансформаторному пуску (рис. 5.4.7) спочатку замикають рубильник 1, що з'єднує зіркою обмотки автотрансформатора. Потім замикають рубильник 2, і двигун виявляється включеним на знижену напругу U'_1 . При цьому пусковий струм двигуна, вимірюваний на виході

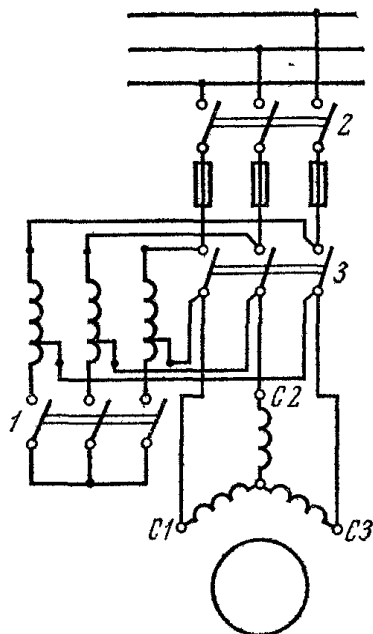


Рис. 5.4.7

автотрансформатора, зменшується в K_a разів, де K_a — коефіцієнт трансформації автотрансформатора. Що ж стосується струму, вимірюваного на вході автотрансформатора, то він зменшується в K_a^2 разів у порівнянні з пусковим струмом при безпосередньому включенні двигуна в мережу. Справа в тому, що в понижуючому автотрансформаторі первинний струм у K_a разів менше вторинного, а тому зменшення пускового струму при автотрансформаторному пуску складає $K_a \cdot K_a = K_a^2$ разів. Так, наприклад, якщо кратність пускового струму двигуна при його безпосередньому включенні в мережу дорівнює $I_n/I_{1н} = 6$, а напруга мережі 380 В, то при автотрансформаторному пуску зі зниженням напруги до 220 В кратність пускового струму складе

$$\frac{I'_n}{I_{1н}} = \frac{6}{\left(\frac{380}{220}\right)^2} = 2.$$

Після того як ротор двигуна прийде в обертання, рубильник 1 розмикають, і автотрансформатор перетворюється в реактивну котушку. При цьому напруга на виводах статорної обмотки трохи підвищується. Включенням рубильника 3 на затиски двигуна подається повна напруга мережі U_{1n} . Таким чином, автотрансформаторний пуск відбувається трьома ступенями: на першому ступені до двигуна підводять напругу, що дорівнює 50—70% від номінального значення; на другому ступені, де трансформатор служить реактором, напруга складає 70—80% від номінального значення. Оскільки застосування автотрансформатора дає зменшення пускового струму в K_a^2 разів $I'_n = I_n / K_a^2$, то потужність, на яку повинний бути розрахований пусковий автотрансформатор,

$$S_a = 3U_{1n}I_n \frac{1}{K_a^2},$$

де U_{1n} —номінальна (фазна) напруга статорної обмотки; I_n —пусковий струм двигуна при пуску безпосереднім включенням у мережу.

Автотрансформаторний спосіб пуску, як і інші способи пуску асинхронних двигунів, що засновані на зменшенні підведеної напруги, супроводжується зменшенням пускового моменту, тому що величина останнього прямо пропорційна квадрату напруги. З погляду пускових струмів і пускових моментів, автотрансформаторний спосіб пуску вигідніше реакторного, тому що при однаковому зменшенні напруги пусковий струм при реакторному способі пуску зменшується у U'_1/U_{1f} разів, а при автотрансформаторному способі пуску в $(U'_1/U_{1f})^2$ разів. Але складність пускової операції і висока вартість апаратури трохи обмежують застосування автотрансформаторного способу пуску асинхронних двигунів.

5.4.2 Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна

Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна визначається формулою

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s).$$

З цього виразу випливає, що швидкість асинхронного двигуна можна відрегулювати зміною якої-небудь із трьох величин: ковзання, частоти струму статора чи числа пар полюсів.

Регулювання швидкості асинхронних двигунів зміною ковзання можливо двома способами: зміною підведеної до обмотки статора напруги і зміною активного опору ланцюга ротора [див. вираз механічної характеристики двигуна].

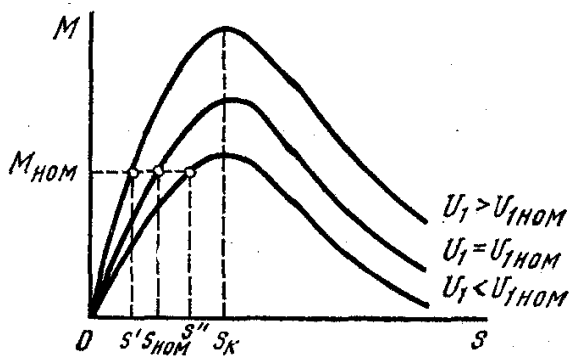


Рис. 5.4.8

Можливість регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів зміною напруги живлення U_1 підтверджується графіками $M=f(s)$, побудованими для різних значень U_1 (рис. 5.4.8). При незмінному навантаженні на валу двигуна збільшення напруги викликає ріст швидкості обертання. Однак діапазон регулювання швидкості виходить невеликий, що пояснюється наступним:

а) вузькою зоною сталої роботи двигуна, обмеженою величиною критичного ковзання;

б) неприпустимістю значного відхилення напруги від номінального значення, тому що з підвищенням U_1 понад номінальне значення виникає небезпека перегріву двигуна, викликаного збільшенням електричних і магнітних втрат, а при значному зменшенні U_1 сильно зменшується перевантажувальна здатність двигуна.

Зміна підведеної до двигуна напруги здійснюється або за допомогою регульовального автотрансформатора або за допомогою реакторів, що включаються в розрив ланцюга статора. Через вузький діапазон регулювання і неекономічності (необхідність додаткових пристроїв) розглянутий спосіб регулювання швидкості не одержав широкого поширення.

Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів зміною ковзання за рахунок активного опору ланцюга ротора можливо лише в двигунах з контактними кільцями.

Механічні характеристики асинхронного двигуна, побудовані для різних значень активного опору ланцюга ротора показують, що зі збільшенням активного опору ланцюга ротора зростає величина ковзання, що відповідає заданому навантажувальному моменту, швидкість обертання двигуна при цьому зменшується. Залежність ковзання (швидкості обертання) від активного опору ланцюга ротора виражається формулою,

$$s = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{\omega_1 M}$$

Практично зміна величини активного опору ланцюга ротора досягається введенням регульовального реостата, подібного до пускового реостата, але розрахованого на тривалий режим роботи. Схема включення цього реостата не відрізняється від схеми, зображеної на рис. 5.4.2, а.

Регулювання швидкості обертання зміною ковзання відбувається тільки в навантаженому двигуні. У режимі холостого ходу зміна активного опору ланцюга ротора майже не впливає на швидкість обертання.

Електричні втрати в ланцюзі ротора пропорційні ковзанню

$$P_{e2} = sP_{em}$$

Звідси випливає, що збільшення ковзання двигуна супроводжується ростом електричних втрат у ланцюзі ротора, а отже, і зниженням ККД двигуна. Так, наприклад, якщо при $M_2=const$ збільшити ковзання двигуна від 0,02 до 0,5, що відповідає зменшенню швидкості обертання приблизно вдвічі, то втрати в ланцюзі ротора складуть половину всієї електромагнітної потужності двигуна. Це свідчить про неекономічність даного способу регулювання.

Крім того, збільшення втрат у ланцюзі ротора при зменшенні швидкості обертання в двигунах із самовентиляцією супроводжується погіршенням умов охолодження, оскільки зі зменшенням швидкості обертання ротора зменшується кількість охолодженого повітря, що проходить через машину.

Розглянутий спосіб регулювання має ще і той недолік, що ділянка механічної характеристики, яка відповідає сталій роботі двигуна, при введенні в ланцюг ротора опору r_{∂} стає більш пологою. А тому коливання навантаження (M_{cm}) сильно впливають на швидкість обертання двигуна.

Однак, незважаючи на зазначені недоліки, регулювання швидкості введенням у ланцюг ротора активного опору широко застосовується в двигунах з контактними кільцями, тому що поряд із плавністю регулювання він забезпечує поліпшення пускових властивостей двигуна.

Регулювання швидкості асинхронних двигунів зміною частоти f_1 засноване на зміні швидкості обертання поля статора

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

Регулювання швидкості в цьому випадку виходить плавним і в широких межах. Однак для зміни частоти f_1 необхідно при кожному регульованому двигуні мати перетворювач частоти, тому що частота живильної мережі завжди повинна бути постійною. У результаті установка стає складною і дорогою. Однак поява сучасних перетворювачів частоти веде до поширення даного методу регулювання швидкості асинхронних двигунів.

Регулювання швидкості *зміною числа полюсів обмотки статора* дає східчасте регулювання, тому що при $f_1=50$ Гц і різному p можна одержати лише наступні значення синхронної швидкості n_1 : 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 об/хв тощо. Змінювати число полюсів в обмотці статора двигуна можна або укладанням на статорі двох обмоток з різним числом пар полюсів, або укладанням на статорі однієї обмотки, конструкція якої дозволяє одержати в двигуні різне число полюсів. Комбінація цих способів дає можливість одержати двигуни з великим числом ступенів регулювання. Найбільш простою виходить обмотка при переключенні полюсів у відношенні 1:2. Принцип перетворення чотирьополусної обмотки в двополусну при послідовному з'єднанні двох секцій збуджений ними магнітний потік утворить чотири полюси (рис. 5.4.9, а); при паралельному з'єднанні цих же секцій одержуємо двополусну обмотку (рис. 5.4.9, б).

Переключення обмотки на два полюси може бути здійснено і при збереженні послідовного з'єднання секцій (рис. 5.4.9, в).

На рис. 5.4.10 зображена одна з можливих схем переключення статорної обмотки з $2p=8$ на $2p=4$, що відповідає зміні синхронної швидкості з 750 до 1500 об/хв. Якщо на статорі розташувати дві подібні обмотки, то одержимо чотиришвидкісний двигун. Виводи секційних статорних обмоток, що дозволяють переключати число полюсів, позначаються так само, як і виводи звичайних статорних обмоток, але з додатковими цифрами, що вказують на число полюсів даної секції.

Багатошвидкісні двигуни випускають на дві, три і чотири швидкості обертання. При цьому статор двигуна може мати одну чи дві обмотки. Наприклад, асинхронний електродвигун серії Т, типу Т-42/8-6-4-2 має на статорі одну обмотку, що допускає переключення на 8, 6, 4 і 2 полюси. При частоті 50 Гц таке переключення відповідає синхронним швидкостям обертання: 750, 1000, 1500, 3000 об/хв.

Обмотка статора цього двигуна має 21 вивід. Регулювання швидкості обертання зміною числа полюсів статорної обмотки застосовується головним чином у двигунах з короткозамкнутим ротором. Це пояснюється тим, що число полюсів короткозамкнутого ротора завжди дорівнює числу полюсів обмотки статора. Тому для зміни швидкості двигуна досить обмежитися переключенням статорної обмотки. У випадку ж двигунів з фазним ротором поряд з переключенням обмотки статора необхідно відповідним чином переключити й обмотку ротора.

Багатошвидкісні двигуни з переключенням полюсів обмотки статора в порівнянні зі звичайними двигунами мають деякі недоліки, що в основному зводяться до наступного: а) великі габарити; б) висока вартість; в) наявність громіздкого багатоконтактного перемикаючого пристрою.

З викладеного випливає, що всі застосовувані способи регулювання швидкості асинхронних двигунів мають істотні недоліки. Цим, зокрема, пояснюється та обставина, що в установках, де потрібно плавне регулювання швидкості в широких межах, асинхронні двигуни, незважаючи на свої конструктивні переваги, дотепер не витиснули двигуни постійного струму.

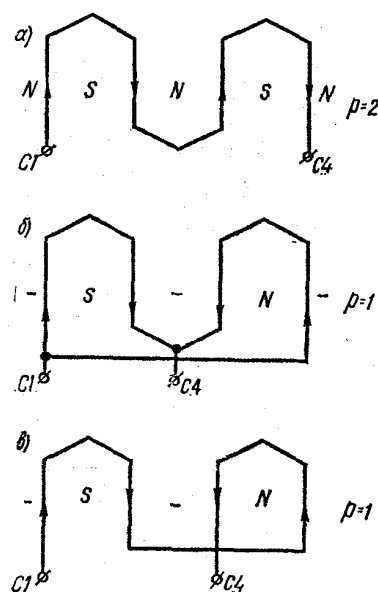


Рис. 5.4.9.

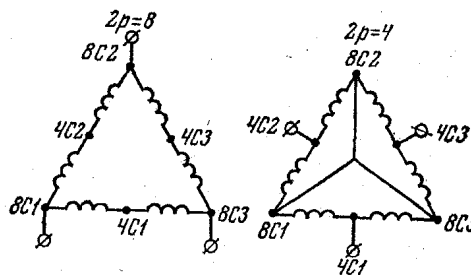


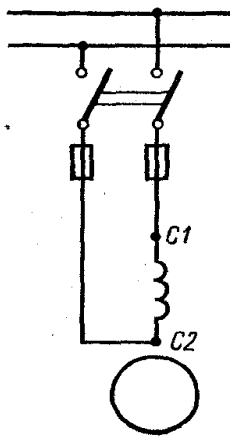
Рис. 5.4.10

5.5 ОДНОФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

5.5.1 Принцип дії однофазного асинхронного двигуна

Статор однофазного асинхронного двигуна має однофазну обмотку, що займає, як правило, $2/3$ загального числа пазів осердя статора. Ротор двигуна робиться короткозамкнутим.

При підключенні двигуна до однофазної мережі (рис. 5.5.1) статорна обмотка створює не обертовий, а пульсуючий магнітний потік з амплітудою $\pm\Phi_{\text{макс}}$. Цей потік може бути розкладений на два потоки Φ_I і Φ_{II} , що



обертаються у протилежні сторони, кожний з яких дорівнює $\Phi_{\text{макс}}/2$ (рис. 5.5.2) і обертається зі швидкістю

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

Припустимо, що ротор двигуна обертається проти руху годинної стрілки, тобто в напрямку потоку Φ_I (рис. 5.5.2). При цьому потік Φ_I будемо називати *прямим*, а потік Φ_{II} *зворотним*.

Тоді ковзання двигуна щодо прямого потоку Φ_I дорівнює

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

а щодо зворотного потоку Φ_{II}

$$s_{II} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} > s_I.$$

Потоки Φ_I і Φ_{II} наводять в обмотці ротора ЕРС E'_{2I} і E'_{2II} , які створюють струми I'_{2I} і I'_{2II} . Відомо, що частота струму в обмотці ротора пропорційна ковзанню $f_1 \bar{f}_2 s$.

Тому що $s_I < s_{II}$, то струм I'_{2II} , наведений зворотним потоком Φ_{II} в обмотці ротора, має частоту набагато більше частоти струму I'_{2I} , наведеного в обмотці ротора прямим потоком Φ_I .

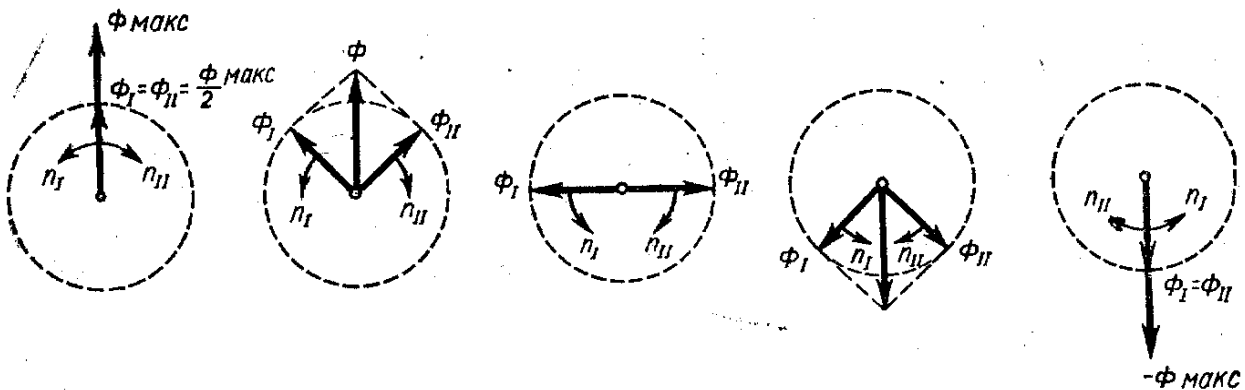


Рис. 5.5.2

Так, наприклад, для однофазного двигуна з $n_1=1500$ об/хв, $n_2=1450$ об/хв, і $f_1=50$ Гц маємо

$$s_I = \frac{1500-1450}{1500} = 0,033; \quad f_{2I} = 0,033 \cdot 50 = 1,8 \text{ Гц};$$

$$s_{II} = \frac{1500+1450}{1500} = 1,96; \quad f_{2II} = 1,96 \cdot 50 = 98 \text{ Гц}.$$

Індуктивний опір обмотки ротора струму I'_{2II} в багато разів більше її активного опору. Тому струм I'_{2II} буде майже чисто реактивним, що робить сильну розмагнічувальну дію на зворотне поле Φ_{II} . У результаті зворотне поле двигуна буде значно послаблено.

Обертаючий момент однофазного двигуна M створюється спільною дією моментів

$$M = M_I + M_{II}.$$

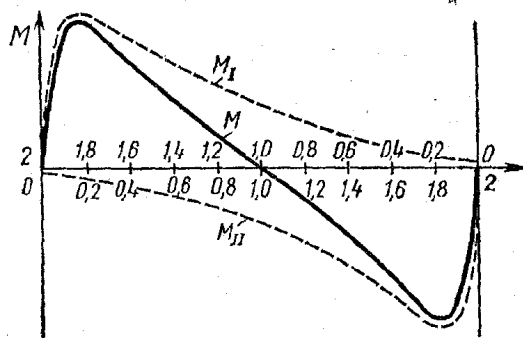


Рис. 5.5.3

Тут M_I – момент, викликаний взаємодією прямого потоку Φ_I зі струмом I'_{2I} , а M_{II} – момент, викликаний взаємодією зворотного потоку Φ_{II} зі струмом I'_{2II} .

На рис. 5.5.3 зображений графік залежності обертаючого моменту M в функції ковзання $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$. Цей графік отриманий у результаті накладення

графіків $M_I = f(s_I)$ і $M_{II} = f(s_{II})$. При малих значеннях ковзання s , що відповідає роботі двигуна в межах номінального навантаження, обертаючий момент M створюється головним чином моментом M_I . При $s_I = s_{II} = 1$ моменти M_I і M_{II} рівні, а тому обертаючий пусковий момент однофазного двигуна дорівнює нулю. Отже, однофазний асинхронний двигун не може самостійно прийти в обертання при підключенні його до мережі, а має потребу в первинному поштовху, тому що лише при $s < 1$ на ротор двигуна починає діяти обертаючий момент.

5.5.2 Пуск у хід однофазного асинхронного двигуна

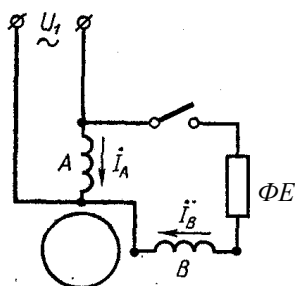


Рис. 5.5.4

Для створення необхідного пускового моменту однофазний двигун оснащують додатковою пусковою обмоткою. Ця обмотка розміщується в 1/3 пазів, що залишилися незаповненими, таким чином, щоб її НС була зрушена на 90 ел. градусів відносно НС робочої (основної) обмотки статора. Крім того, у коло пускової обмотки включають фазозміщуючий елемент (рис. 5.5.4), що необхідно для створення фазового

зрушення між струмами в робочій I_A і пусковій I_B обмотках. Як фазозміщуючий елемент (ФЕ) можуть застосовуватися активний опір, індуктивність чи ємність. Після того як ротор двигуна розженеться до швидкості, близької до сталої, пускову обмотку відключають.

Для одержання обертового поля за допомогою двох обмоток на статорі, зміщених у просторі відносно одна одної на кут 90° , необхідне дотримання наступних умов:

а) НС робочої F_A і пускової F_B обмоток повинні бути однакові і зрушені в просторі відносно один одного на 90° ;

б) струми в обмотках статора I_A і I_B повинні бути зрушені по фазі відносно один одного на 90° .

При строгому дотриманні зазначених умов обертове поле статора є круговим, що відповідає найбільшому значенню електромагнітного моменту. При порушенні якого-небудь із зазначених вище умов обертове поле стає еліптичним, що складається з двох не рівних по величині кругових полів, що обертаються в різні сторони: прямого і зворотного. Зворотне обертове поле створює на роторі гальмовий момент і погіршує робочі властивості двигуна.

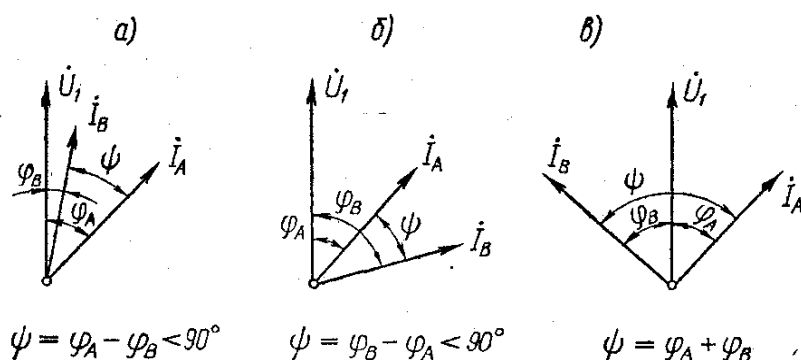


Рис. 5.5.5

З векторних діаграм, приведених на рис. 5.5.5, видно, що активний опір (рис. 5.5.5, а) чи індуктивність (рис. 5.5.5, б) не забезпечують фазового зрушення ψ між струмами в обмотках статора I_A і I_B у 90° . Лише тільки ємність (рис. 5.5.5, в) як ФЕ забезпечує $\psi=90^\circ$. Величина цієї ємності вибирається такою, щоб струм пускової обмотки I_B в момент пуску двигуна ($s=l$) випереджав по фазі напругу U_1 на φ_B , що доповнює кут φ_A до 90° ,

$$\psi = \varphi_A + \varphi_B = 90^\circ.$$

Якщо при цьому обидві обмотки створюють однакові НС, то в момент включення двигуна в мережу в ньому буде створено кругове обертове поле і двигун буде розвивати значний початковий пусковий момент.

Таким чином, ємність є найкращим ФЕ і забезпечує однофазному двигуну гарні пускові властивості.

Але застосування ємності як ФЕ іноді обмежується великими габаритами конденсаторів, тим більше, що для одержання кругового обертового поля при

пуску електродвигуна в хід потрібна значна ємність. Наприклад, при потужності двигуна 200 Вт необхідна ємність $C=30$ мкФ при робочій напрузі близько 300–500 В.

Виходячи з цих розумінь найбільше поширення одержали однофазні асинхронні двигуни з активним опором як ФЕ. Через те, що пускова обмотка знаходиться включеною нетривалий час (тільки на час пуску двигуна в хід), її виконують проводом меншого перерізу. Це забезпечує пусковій обмотці підвищений активний опір. Крім того, частину пускової обмотки іноді виконують біфілярною, чим знижують її індуктивність. У підсумку пускова обмотка відрізняється від робочої великим активним опором і невеликою індуктивністю. І хоча кут зрушення фаз між струмами \dot{I}_A і \dot{I}_B все-таки менше 90° , пускові властивості цих двигунів виявляються цілком задовільними

$$\frac{M_n}{M_n} = 1,0 - 1,2; \quad \frac{I_n}{I_n} = 6,5 - 9.$$

Електродвигуни з підвищеним активним опором пускової обмотки широко використовуються там, де не потрібно великих пускових моментів.

У випадку ж необхідності одержання більшого пускового моменту як ФЕ застосовують ємність. Це дає можливість підвищити пусковий момент до значень

$$\frac{M_n}{M_n} = 1,6 - 2.$$

Як вказувалося, по закінченні процесу пуску коло пускової обмотки варто відключити. Якщо цього не зробити, то пускова обмотка, що виконана проводом меншого перерізу і не розрахована на тривалий струм, буде перегріватися.

Відключення пускової обмотки звичайно автоматизується і здійснюється за допомогою реле.

5.5.3 Асинхронні конденсаторні двигуни

Асинхронний конденсаторний двигун має на статорі дві обмотки, що займають однакове число пазів і зсунуті в просторі відносно одна одної на кут 90° . Ротор двигуна робиться короткозамкненим. Одна з обмоток статора, що названа *головною*, включається безпосередньо в однофазну мережу, а інша, названа *допоміжною*, включається в цю ж мережу, але через конденсатор C_p , названий робочим конденсатором (рис. 5.5.6, а).

На відміну від розглянутого раніше однофазного асинхронного двигуна в конденсаторному двигуні допоміжна обмотка після пуску не відключається і залишається включеною протягом усього процесу роботи двигуна.

Ємність C_p у ланцюзі допоміжної обмотки створює зрушення по фазі між струмами \dot{I}_A і \dot{I}_B .

Таким чином, якщо однофазний асинхронний двигун по закінченні процесу пуску працює з пульсуючим магнітним полем статора, то конденсаторний електродвигун працює з круговим обертовим магнітним полем чи близьким до кругового. Тому однофазні конденсаторні двигуни по своїх властивостях наближаються до трифазних асинхронних двигунів.

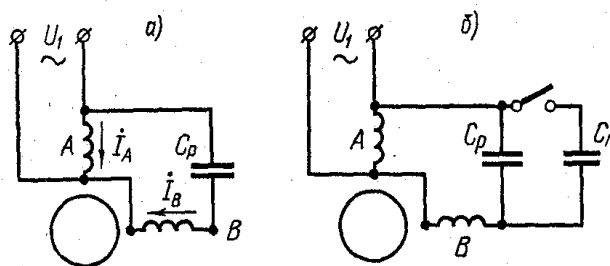


Рис. 5.5.6

Величина ємності C_p , що необхідна для одержання кругового обертового поля, може бути визначена виразом

$$C_p = \frac{I_A \sin \phi_A}{2\pi f_1 U_A K^2} 10^6 \text{ [мкФ]},$$

при цьому відношення напруг на головній $U_A = U_1$ і на допоміжній U_B обмотках повинне бути $\frac{U_A}{U_B} = \frac{\tan \phi_A}{K} \neq 1$.

У цих виразах: ϕ_A – зсув фаз між струмом \dot{I}_A і напругою \dot{U}_A при круговому полі; K – коефіцієнт трансформації, що являє собою відношення кількості витків допоміжної і головної обмоток

$$K = \frac{w_B K_B}{w_A K_A},$$

де K_B і K_A — обмоткові коефіцієнти обмоток статора.

Аналіз показує, що при заданих K і U_A/U_B ємність C_p забезпечує одержання кругового обертового поля лише при одному, цілком визначеному режимі роботи двигуна, тому що при зміні режиму роботи міняються \dot{I}_A і ϕ_A . Таким чином, при відхиленнях режиму роботи двигуна від розрахункового обертове поле стає еліптичним і робочі властивості двигуна значно погіршуються. Найчастіше конденсаторні двигуни розраховуються так, щоб кругове обертове поле було при номінальному чи близькому до нього навантаженню.

Конденсаторні двигуни мають порівняно високий ККД ($\eta = 60\text{--}75\%$) і коефіцієнт потужності ($\cos \phi_1 = 0,8\text{--}0,95$). Однак пускові властивості двигуна незадовільні. Справа в тому, що при пуску в хід магнітне поле двигуна не кругове, тому що кругове обертове поле відповідає лише визначеному значенню навантаження. Тому пусковий момент конденсаторного двигуна звичайно не перевищує 50% номінального. Виходячи з цього конденсаторні

двигуни доцільно застосовувати лише для привода механізмів з легкими умовами пуску. Для підвищення пускового моменту конденсаторного двигуна в схему включають два конденсатори (див. рис. 5.5.6, б).

Конденсатор C_n називають пусковим і включають його лише на час пуску. Величина ємності C_n вибирається з умови одержання найбільшого пускового моменту. Після розгону ротора пускову ємність варто відключити, тому що при невеликих ковзаннях можливий резонанс напруг, у результаті якого напруга на затисках конденсатора й в обмотках статора може перевищити напругу мережі в 2–3 рази.

Конденсаторні двигуни з робочою і пусковою ємністю застосовуються для привода механізмів з важкими умовами пуску.

5.5.4 Універсальні асинхронні двигуни

В даний час широке поширення одержали універсальні асинхронні двигуни. Такий двигун являє собою асинхронний двигун невеликої потужності з короткозамкнутою обмоткою ротора і трифазною обмоткою статора. Універсальним цей двигун називають тому, що він без яких-небудь змін у конструкції може бути використаний як трифазний, так і однофазний.

При використанні універсального асинхронного двигуна як однофазного його обмотки статора з'єднують по одній зі схем, приведених на рис. 5.5.7.

Тут, так само як і в конденсаторних двигунах, робоча ємність розраховується на визначену потужність навантаження, наприклад номінальну, тому при коливаннях навантаження робочі властивості двигуна погіршуються.

Можливі випадки небезпечного перевантаження чи недовантаження двигуна, при яких обмотка тієї чи іншої фази вигорає.

При використанні універсального асинхронного двигуна в однофазному режимі його потужність у порівнянні з трифазним режимом знижується. В однофазному режимі ці двигуни використовуються як конденсаторні.

Аналогічно універсальному асинхронному двигуну як однофазний можна

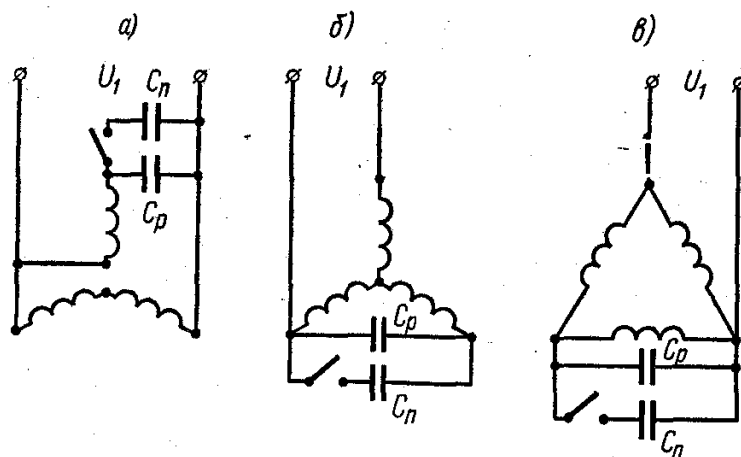


Рис. 5.5.7

використовувати звичайний трифазний асинхронний двигун. Обмотка

статора такого двигуна в однофазному режимі може бути з'єднана по одній зі схем, приведених на рис. 5.5.7.

Величину робочої ємності C_p у мікрофарадах при частоті струму 50 Гц можна визначити по одній з формул:

$$\text{для схеми на рис. 5.5.7, а, } C_p = 2740 I_{1н} / U_{1н};$$

$$\text{для схеми на рис. 5.5.7, б, } C_p = 2800 I_{1н} / U_{1н};$$

$$\text{для схеми на рис. 5.5.7, в, } C_p = 4800 I_{1н} / U_{1н}.$$

Якщо пуск двигуна здійснюється вхолосту чи з невеликим навантаженням на валу, то пускова ємність не потрібна. Якщо ж двигун пускається в хід зі значним навантаженням на валу, то пускова ємність C_n необхідна.

Величина цієї ємності приймається рівною $C_n = (2,5—3)C_p$. У цьому випадку пусковий момент двигуна стає близьким до номінального. При необхідності подальшого збільшення пускового моменту ємність C_n варто збільшити.

Так, при $C_n = (6—8)C_p$ пусковий момент наближається до максимального.

Варто пам'ятати, що при використанні трифазного двигуна в однофазному режимі з відключенням однієї з фазних обмоток його потужність використовується лише на 60%, а при однофазному конденсаторному режимі – на 75–80%.

5.5.5 Асинхронний виконавчий двигун

Асинхронні виконавчі двигуни застосовуються в пристроях автоматики і призначені для перетворення електричних сигналів у механічне переміщення.

На статорі цього двигуна є дві обмотки: обмотка збудження, постійно включена в мережу змінного струму, і обмотка керування, на затиски якої підводиться сигнал U_c (рис. 5.5.8).

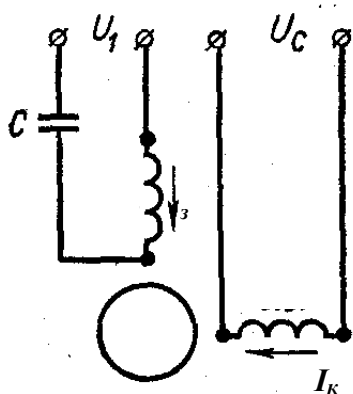


Рис. 5.5.8

Осі обмоток зсунуті в просторі одна відносно одної під кутом 90° . У ланцюг обмотки збудження включається ємність, що викликає фазове зрушення між струмами I_z і I_k . Усе це забезпечує створення в двигуні обертового магнітного поля. Якщо ж на обмотку керування сигнал не поданий, то в двигуні діє пульсуюче поле, що не створює пускового моменту.

Однак після припинення сигналу U_c двигун продовжує працювати як звичайний однофазний двигун. Це явище, що назване *самоходом*, неприпустиме у виконавчому двигуні, тому що робить його некерованим. Для усунення самоходу ротор виконавчого двигуна виконують з підвищеним активним опором.

Для пояснення цього на рис. 5.5.9, а зображені механічні характеристики однофазного двигуна.

При наявності сигналу U_c двигун працює з обертовим магнітним полем і його механічна характеристика має вигляд кривої $M_I=f(s)$. Припустимо, двигун працює в режимі, що відповідає точці А. Після припинення сигналу поле статора стає пульсуючим і механічна характеристика двигуна набуває вигляд кривої $M=f(s)$.

Новий режим роботи двигуна визначиться точкою В, при цьому електромагнітний момент двигуна залишиться позитивним і ротор двигуна буде продовжувати обертатися.

Якщо збільшити активний опір ротора, то графіки $M_I=f(s)$ і $M_{II}=f(s)$ зміняться: максимум моменту зміститься в область великих ковзань. Так само змінить свою форму і графік результуючого моменту $M=f(s)$ (рис.5.5.9, б). Тепер після припинення сигналу U_c , тобто при переході виконавчого двигуна в однофазний режим, електромагнітний момент стає негативним (точка В), і здійснює на ротор двигуна гальмуючу дію, усуваючи самохід.

До виконавчого двигуна пред'являється також вимога *малоінерційності* (швидкодії), тобто щоб з подачею сигналу на обмотку керування ротор двигуна якнайшвидше досягав установленної швидкості обертання. Для задоволення цієї вимоги ротор виконавчого двигуна робиться полегшеним: не має сердечника й обмотки. Такий двигун називається *двигуном з порожнім немагнітним ротором*. Замість обмотки на роторі двигуна розташовується тонкостінна алюмінієва склянка, що забезпечує двигуну, по-перше, підвищений активний опір ротора, а отже, усунення самоходу, і по-друге, малий момент інерції ротора, тобто малоінерційність.

Двигун має два статора: зовнішній, з обмоткою, і внутрішній, без обмотки, що входить усередину порожнього ротора. Внутрішній статор необхідний для зменшення магнітного опору основного потоку.

У порівнянні з асинхронними двигунами звичайної конструкції двигуни з немагнітним ротором мають більші габарити і більш низький ККД. Пояснюється це повітряним зазором. Великий повітряний зазор веде до збільшення струму, що намагнічує, і зросту втрат.

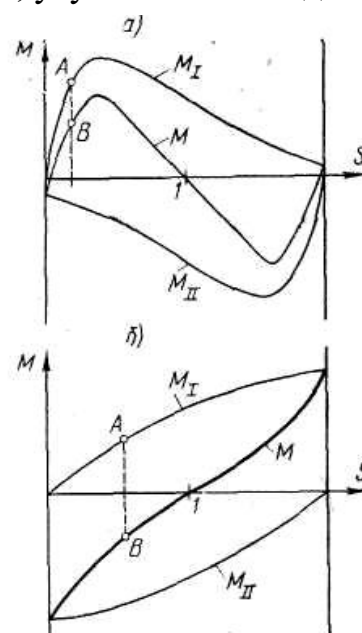


Рис. 5.5.9

Розв'язування задач до розділу 5.

Задача № 5.1. На паспортній таблиці асинхронного двигуна, призначеного для вмикання в мережу частотою $f_1=50$ Гц, вказана швидкість обертання $n_n=1440$ об/хв; необхідно визначити номінальне ковзання.

Рішення задачі 5.1:

Синхронна швидкість n_1 , якщо $f_1=50$ Гц, яка відповідає $n_n=1440$ об/хв, дорівнює 1500 об/хв; при цьому число пар полюсів обмотки статора буде:

$$p = \frac{f_1 \cdot 60}{n_1} = \frac{50 \cdot 60}{1500} = 2, \text{ тобто } 2p=4.$$

Номінальне ковзання двигуна:

$$S_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04, \text{ або } 4\%.$$

Відповідь: $S_n=4\%$.

Задача № 5.2. Трьохфазний асинхронний двигун при номінальному навантаженні на валу споживає потужність $P_1=10$ кВт, при напрузі 380 В, має слідує дані: $S_n=4\%$, $\cos\varphi_n=0,8$, $P_{\text{мех}}=3\%$, $P_{\text{с1}}=3,3\%$ та $P_{\text{д}}=0,5\%$ від потужності P_1 , $r_{75}=0,28$ Ом, обмотка статора з'єднана зіркою. Визначити К.К.Д. двигуна при номінальному навантаженні.

Рішення задачі 5.2:

Струм в фазній обмотці статора:

$$I_{1n} = \frac{P_1 \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_1 \cdot \cos\varphi_n} = \frac{10 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,8} = 19 \text{ А};$$

Електричні втрати в обмотці статора:

$$p_{e1} = m_1 \cdot I_{1n}^2 \cdot r_{75} = 3 \cdot 19^2 \cdot 0,28 = 300 \text{ Вт};$$

Магнітні втрати в сердечнику статора:

$$p_{c1} = 0,033 \cdot 10000 = 330 \text{ Вт};$$

Електромагнітна потужність двигуна:

$$P_{em} = P_1 - (p_{c1} + p_{e1}) = 10000 - (330 + 300) = 9370 \text{ Вт};$$

Електричні втрати в роторі:

$$p_{e2} = S_n \cdot P_{em} = 0,04 \cdot 9370 = 375 \text{ Вт};$$

Механічні втрати:

$$p_{\text{мех}} = 0,03 \cdot 10000 = 300 \text{ Вт};$$

Додаткові втрати:

$$p_{\text{д}} = 0,005 \cdot 10000 = 50 \text{ Вт};$$

Сума втрат:

$$\sum p = 330 + 300 + 375 + 300 + 50 = 1355 = 1,355 \text{ кВт}.$$

К.К.Д. двигуна:

$$\eta_n = 1 - \frac{\sum P}{P_1} = 1 - \frac{1,355}{10} = 0,865 \text{ або } 86,5\%.$$

Відповідь: $\eta_n = 86,5\%$.

Задача № 5.3. Визначити Е.Р.С., які індукуються в фазі статора і ротора асинхронного короткозамкнутого двигуна при нерухомому роторі, та роторі що обертається якщо $\Phi_m = 0,011$ Вб, $S=0,03$, $\omega_1 = 96$, $2p=6$, $k_{об1}=0,91$, $f_1 = 50$ Гц.

Примітка. Для короткозамкнутого ротора число витків фази $\omega_2 = 0,5p$, а обмотковий коефіцієнт $k_{об2} = 1$.

Рішення задачі 5.3:

Знаходимо Е.Р.С. фази статора:

$$E_1 = 4,44 \cdot k_{об1} \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot 0,91 \cdot 50 \cdot 96 \cdot 0,011 \approx 213 \text{ В.}$$

Число витків фази ротора:

$$\omega_2 = 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 3 = 1,5.$$

Е.Р.С. фази ротора при нерухомому роторі:

$$E_2 = 4,44 \cdot k_{об2} \cdot \omega_2 \cdot f_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 50 \cdot 0,011 \approx 3,65 \text{ В.}$$

Е.Д.С. фази ротора що обертається:

$$E_{2S} = E_2 \cdot S = 3,65 \cdot 0,03 = 0,11 \text{ В.}$$

Відповідь: $E_{2S} = 0,11 \text{ В.}$

Задача № 5.4. Визначити при номінальному навантаженні К.П.Д. асинхронного двигуна, основні данні якого: $I_n = 14 \text{ А}$, $U_{1н} = 380 \text{ В}$, $S_n = 3\%$, $r_{l75} = 0,64 \text{ Ом}$, $\cos \varphi_n = 0,86$, $P_C = 170 \text{ Вт}$, $P_{МЕХ} = 94 \text{ Вт}$, та $P_{доо} = 40 \text{ Вт}$.

Рішення задачі 5.4:

Електричні втрати статора при номінальному навантаженні будуть:

$$P_{e1} = 3 \cdot I_n^2 \cdot r_{l75} = 3 \cdot 14^2 \cdot 0,64 = 376 \text{ Вт.}$$

Потужність, яка використовується з мережі при номінальному навантаженні,

$$P_{1H} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n = 1,73 \cdot 380 \cdot 14 \cdot 0,86 = 7900 \text{ Вт.}$$

Електромагнітна потужність двигуна:

$$P_{EM} = P_{1H} - (P_C + P_{e1}) = 7900 - (170 + 376) = 7354 \text{ Вт.}$$

Електричні втрати ротора:

$$P_{e2} = S \cdot P_{EM} = 0,03 \cdot 7354 = 220 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати:

$$\sum P = P_C + P_{e1} + P_{e2} + P_{МЕХ} + P_{доо} = 170 + 376 + 220 + 94 + 40 = 900 \text{ Вт.}$$

К.П.Д. двигуна:

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{7900 - 900}{7900} = 0,89.$$

Відповідь: $\eta = 0,89$.

Задача № 5.5. Визначити номінальний струм трифазного асинхронного короткозамкнутого електродвигуна типу АО2 32-2 та його пусковий струм, якщо $P_n = 4$ кВт, $\cos \varphi_n = 0,9$, $\eta_n = 86\%$, $I_n/I_n = 6,6$, $U_{л.н} = 380$ В. Обмотки статора з'єднані зіркою.

Рішення задачі 5.5:

Номінальний струм двигуна:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{4000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,86 \cdot 0,9} = 7,8 \text{ А}.$$

Пусковий струм:

$$I_n = 6,6 \cdot I_n = 6,6 \cdot 7,8 = 51,4 \text{ А}.$$

Відповідь: $I_n = 7,8 \text{ А}$, $I_n = 51,4 \text{ А}$.

Задача № 5.6. Визначити обертовий момент асинхронного двигуна, у якого $P_2 = 7$ кВт, $n_2 = 1450$ об/хв.

Рішення задачі 5.6:

Обертаючий момент

$$M = 9,55 \cdot \frac{7 \cdot 1000}{1450} \approx 46,1 \text{ Н м}.$$

Відповідь: $M \approx 46,1 \text{ Н м}$.

Задача № 5.7. Визначити опір фази регулюючого реостата для трьохфазного асинхронного двигуна з фазним ротором, щоб знизити швидкість його обертання з 720 до 600 об/хв при номінальному моменті M_n , якщо $2p=8$, а опір фази ротора $r_{рот} = 0,018$ Ом.

Рішення задачі 5.7:

Опір реостата визначають з співвідношення:

$$\frac{r_{реост} + r_{рот}}{S} = \frac{r_{рот}}{S_n},$$

де S – ковзання ротора після вмикання реостата ;

S_n - ковзання ротора при номінальному обертаючому моменті, без реостата в ланцюгу ротора.

Синхронне число обертів:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/хв.}$$

Номинальне ковзання:

$$S_n = \frac{n_1 - n_{2n}}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0.04.$$

Ковзання після вмикання реостата:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{750 - 600}{750} = 0.2.$$

З першого співвідношення знаходимо, що:

$$r_{\text{реост}} = r_{\text{рот}} \cdot \left(\frac{S}{S_n} - 1 \right) = 0.018 \cdot \left(\frac{0.2}{0.04} - 1 \right) = 0.072 \text{ Ом.}$$

Відповідь: $r_{\text{реост}} = 0.072 \text{ Ом.}$

Контрольні питання

1. Яка будова асинхронних машин?
2. Які є типи роторів? Чим вони відрізняються?
3. Поясніть принцип роботи асинхронного двигуна,
4. Чому двигун називається асинхронним?
5. Яка величина характеризує асинхронність двигуна?
6. Від яких параметрів двигуна залежить його електромагнітний момент?
7. Що визначає критичне ковзання? Якими параметрами визначається критичне ковзання?
8. Наведіть механічну характеристику АД і вкажіть точку стійкої роботи.
9. За якими способами здійснюють пуск асинхронних двигунів?
10. Якими способами регулюють швидкість обертання ротора?
11. В яких режимах може працювати асинхронна машина?
12. У чому особливість однофазних і конденсаторних асинхронних двигунів?
13. Які властивості характерні асинхронним виконавчим двигунам?

Розділ 6 ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ

6.1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

6.1.1 Структура електричних мереж

Сукупність електроустановок, призначених для забезпечення споживачів електричною енергією, називається системою електропостачання (СЕР).

Одним з основних елементів СЕР є електричні мережі. *Електрична мережа* – сукупність електроустановок для передачі і розподілу електричної енергії, яка складається з підстанцій, розподільних устаткувань, струмопроводів, повітряних і кабельних ліній електропередачі, котрі працюють на певній території.

Електрична мережа – частина СЕР, яка служить для передачі електроенергії від місць її виробництва до місць споживання і розподілу її між споживачами.

Передача електричної енергії на значні відстані можлива й економічно доцільна тільки по лініях передачі високої напруги. З цією метою електрична енергія, яка виробляється генераторами, перетворюється в енергію високої напруги за допомогою трансформаторів, які встановлюються безпосередньо на електростанціях. Підстанції, на яких проводиться ця трансформація, називаються підвищувальними (або підвищуючими) трансформаторними підстанціями. Приймальні ж підстанції, які перетворюють електричну енергію з напруги, при якій вона передавалась по лініях передачі, до напруги приєднаної до підстанції розподільної мережі, називаються понижувальними (або понижуючими) трансформаторними підстанціями (ТП). Розподільні устаткування, призначені для приймання і розподілу електроенергії на одній напрузі без перетворення і трансформації її, називаються розподільними пунктами. Вони в склад підстанції не входять.

Розподільні устаткування генераторної напруги електростанції і понижувальних підстанцій, до яких приєднані розподільні мережі даного району, називаються центрами живлення.

Часто розглядають тільки деяку частину електричної мережі, для якої живильною є вся її попередня частина (по шляху передачі електроенергії), а споживальною – вся наступна.

По шляху передачі електроенергії поступово змінюються як потужність, так і дальність передачі.

У зв'язку з цим виникає потреба в зміні параметрів електроенергії.

Перетворення електроенергії зі зміною її параметрів проводиться на підстанціях. Тому джерелом живлення для мережі може бути і підстанція.

Отже, можна користуватись такими поняттями: живильний кінець мережі, приймальний кінець мережі, живильна підстанція, приймальна підстанція.

Мережа може мати одночасно декілька живильних і декілька приймальних кінців. Одна й та сама підстанція може одночасно бути:

- а) живильною (джерелом живлення) для частини мережі нижчої напруги;
- б) приймальною (споживачем) у мережі більш високої напруги.

При цьому мережі різних напруг розглядаються окремо.

Електричні мережі можуть мати різні властивості, неоднакову довжину і пропускну здатність, характеризуватися різними техніко-економічними показниками. Разом з цим різні електричні мережі мають і деякі загальні ознаки, які дозволяють розглядати їх у сукупності.

6.1.2 Призначення електричних мереж

Головне призначення електричних мереж – електропостачання споживачів. Електричні мережі служать для приєднання споживачів до джерел живлення. Це досить складне завдання через велику кількість споживачів і значну територію, на якій вони розташовані.

Друге призначення електричних мереж – передача електроенергії від місця її вироблення до місця споживання. Часто джерела енергії розташовані на значній відстані від центрів споживання – великих заводів, населених пунктів тощо. При цьому виникає завдання передачі енергії, яке вирішується за допомогою електричної мережі.

Нарешті, за допомогою електричних мереж удається значно підвищити економічну ефективність систем електропостачання споживачів. Це досягається шляхом створення великих енергетичних систем. Доцільність їх створення обумовлена істотними техніко-економічними перевагами. До них належать:

- 1) можливість збільшення одиничної потужності генераторів та електростанцій. Таке збільшення, як відомо, зменшує вартість спорудження електростанцій та їх експлуатації;
- 2) значне підвищення надійності електропостачання споживачів за рахунок збільшення кількості зв'язків із різними станціями в енергосистемі;
- 3) підвищення економічності роботи різних типів електростанцій, більш повне і раціональне використання всього наявного обладнання;
- 4) зниження на електростанціях необхідної резервної потужності, яка в даному випадку є загальною для всіх електростанцій і т.д.

При аналізі роботи електричних мереж окремі генератори й електроприймачі звичайно безпосередньо не розглядаються. Пункти живлення й споживання в цілому відображаються деякими укрупненими показниками у вигляді так званих навантажень.

6.1.3 Класифікація електричних мереж

Електричні мережі доцільно класифікувати за рядом показників, основними з яких є такі: призначення, район обслуговування, конструктивне виконання, рід струму, характер споживачів, номінальна напруга, конфігурація, режим нейтралі.

За призначенням електричні мережі підрозділяються на живильні, розподільні й основні. Розподільною мережею називають сукупність окремих ліній, призначених для передачі електроенергії і безпосереднього живлення приймачів (рис. 6.1.1). Ці лінії підрозділяються на магістралі, фідери і відгалуження.

Магістраллю називають лінію від джерела електроенергії до декількох споживачів, які вмикаються до магістралі за допомогою відгалужень.

Фідером називають лінію електропередачі від джерела тільки до одного споживача або до одного розподільного устаткування.

Розподільні мережі можуть бути магістральними, радіальними і кільцевими. Звичайно це мережі з номінальною напругою до 20 кВ.

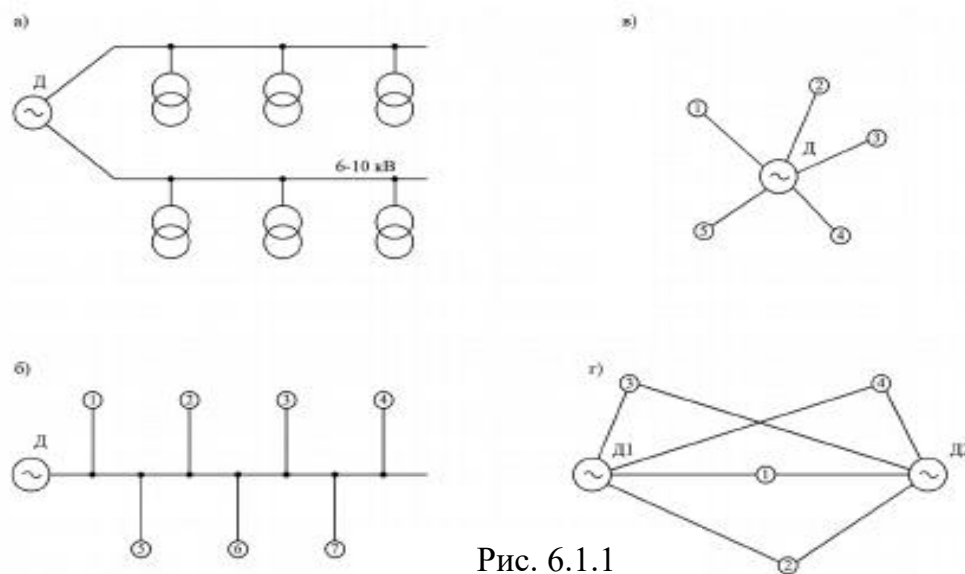


Рис. 6.1.1

Магістральна мережа передбачає електроживлення споживачів від магістралі через відгалуження, як це показано на рис. 6.1.1, б. Така мережа найекономічніша за витратою кабелю, але в той же час і занадто вразлива: пошкодження магістралі позбавляє електроенергії відразу декількох (або навіть усіх) споживачів.

Радіальна мережа передбачає електроживлення кожного споживача по своєму окремому фідеру, як це показано на рис. 6.1.1, в. При цьому капітальні затрати на них більші, ніж у магістральній мережі, але зате радіальна мережа має підвищену надійність (вихід із ладу одного фідера порушує роботу тільки

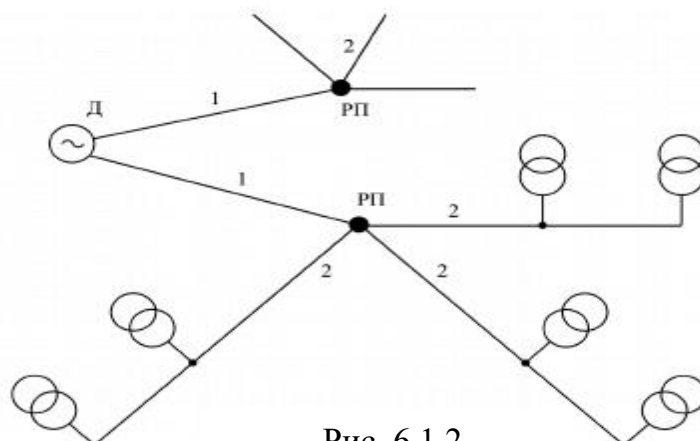


Рис. 6.1.2

одного споживача), проста за будовою, дозволяє швидко нарощувати кількість споживачів.

На цей час найбільш широко застосовуються радіальні мережі, при чому з метою підвищення надійності електроживлення використовується двофідерне живлення споживачів (рис. 6.1.1, з).

Живильні електромережі служать для передачі електроенергії на розподільні підстанції (РП), від яких живляться розподільні мережі (рис. 6.1.2). Звичайно ці мережі напругою 35 кВ і вище. Напруга живильної 1 і розподільної 2 мереж однакова.

У деяких випадках буває важко розділити мережу на живильну і розподільну.

Основними мережами електричної системи звичайно називають мережі напругою 220 кВ і вище. За районом обслуговування відрізняють місцеві і районні мережі. Місцевими електромережами звичайно називають мережі напругою до 35 кВ включно, які обслуговують невеликі райони в радіусі не більш як 15-30 км з відносно малою густиною навантаження.

Районні електромережі – це мережі напругою 110 кВ і вище, які пов'язують електростанції електричної системи між собою і з центрами навантажень.

Районні мережі охоплюють великі райони й утворюють, як правило, замкнені контури, до яких приєднуються понижувальні підстанції.

За конструктивним виконанням відрізняють повітряні і кабельні лінії та внутрішні проводки.

Повітряною називається лінія, виконана неізолюваними проводами, які за допомогою ізоляторів підвішуються над землею на спеціальних опорах. Зовнішні мережі (поза будівлями) по можливості виконують повітряними. Вони більш прості при спорудженні та експлуатації і дешевші за кабельні.

Електромережі можуть бути виконані голими або ізолюваними проводами, шинами і кабелями. Зовнішні електромережі, виконані кабелями, називають кабельними. *Кабелем* називається система проводів, ізолюваних взаємно і від навколишнього середовища. Кабельні лінії звичайно прокладаються в землі. Це має свої переваги – безпека, скорочення території, необхідної для відчуження тощо, але й свої недоліки – велика вартість, труднощі експлуатації й усунення пошкоджень, складність виготовлення кабелів тощо. Кабельними виконують мережі в тих випадках, коли застосування повітряних з будь-яких причин виявляється неприпустимим – в умовах великого міста, на території промислового підприємства і т.п.

Внутрішні проводки виконуються ізолюваними (іноді й неізолюваними) проводами, які прокладаються на ізоляторах або в трубах по стінах і стелях будівель або всередині стін, а також спеціальними шинопроводами. Іноді для цього використовуються і кабелі, які прокладаються в каналах – у підлозі або на стінах.

За родом струму розрізняють мережі змінного і постійного струму. Як правило, електромережі виконуються за системою трифазного струму, що найбільш вигідно економічно, а також зручно, оскільки може проводитись трансформація енергії. При великій кількості електроприймачів однофазного струму від трифазних мереж здійснюють однофазні відгалуження (рис. 6.1.3). Однофазними виконуються, наприклад, внутрішні квартирні мережі.

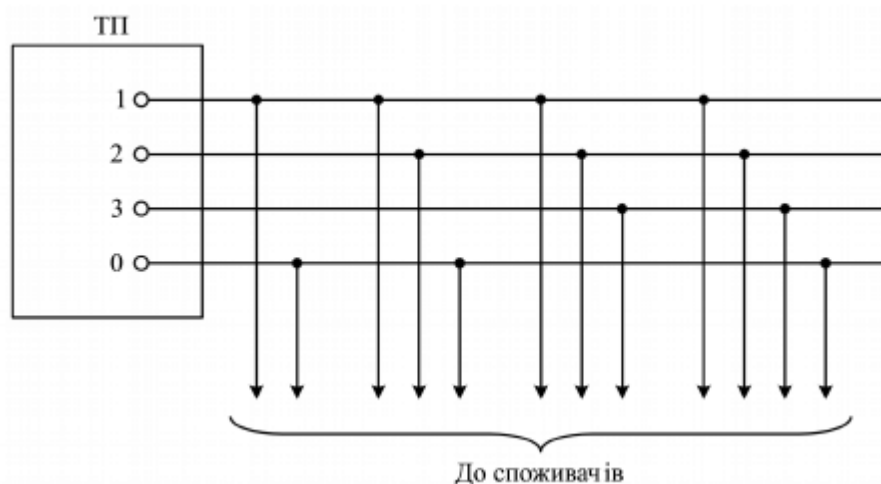


Рис. 6.1.3

Мережі постійного струму виконуються зараз відносно рідко, наприклад, на промислових підприємствах з великою кількістю двигунів, які вимагають зміни швидкості обертання у великих границях, або в електролізних цехах хімічних підприємств. Постійний струм звичайно одержують за допомогою вентильних (або інших) перетворювачів, які встановлюють на самому підприємстві.

Постійний струм високої напруги зараз застосовується для ліній електропередачі великої протяжності. Незважаючи на істотні переваги змінного струму, його застосування для передачі енергії на великі відстані зустрічає значні труднощі, пов'язані із забезпеченням стійкості паралельної роботи генераторів електростанцій.

Подолання цих труднощів призводить до значних додаткових витрат. Успіхи в перетворювальній техніці привели до істотного підвищення економічності застосування потужних електропередач постійного струму високої напруги. Однак і тут постійний струм застосовується тільки для лінії електропередачі, по кінцях якої проводиться його перетворення в змінний струм.

За характером споживачів розрізняють: міські мережі, мережі промислових підприємств, сільські мережі тощо. Кожна мережа характеризується номінальною напругою, на яку розраховуються елементи її електричного обладнання. Прийняті стандартні значення номінальних напруг $U_{ном}$: 6, 10, 20, 35, 110 та 220 кВ.

Розрахунок максимальної робочої напруги робиться за формулою $U_{н.р} = 1,15U_{ном.}$ для номінальних напруг 3 – 220 кВ.

За напругою електромережі, як і всі електроустановки, розподіляються на мережі напругою до 1000 В і мережі напругою вище 1000 В або умовно на електромережі низької і високої напруги.

За конфігурацією електромережі підрозділяють на розімкнені (радіальні) і замкнені.

Розімкненою називається мережа, в якій споживачі електроенергії отримують живлення тільки з одного боку. Недоліком таких мереж є припинення живлення навантажень при пошкодженні відповідної лінії.



Рис. 6.1.4

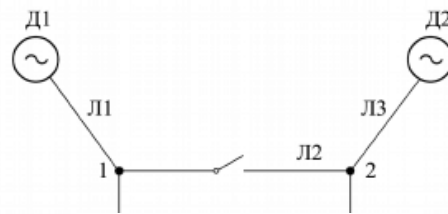


Рис. 6.1.5

Замкненою називається мережа, у якій споживачі електроенергії можуть отримувати живлення не менш як з двох боків. На рис 6.1.4 наведена схема найпростішої замкненої мережі – лінії із живленням навантажень А і В від двох джерел Д1 і Д2. При пошкодженні лінії на ділянці Д1-А і вимкненні джерела Д1 живлення навантажень А і В зберігається від джерела Д2.

Один із видів розімкнених мереж – розімкнені резервовані мережі, які забезпечують підвищену надійність електропостачання споживачів. У цих мережах живлення споживачів може бути відновлено шляхом виконання перемикачів – вручну або автоматично. Наприклад, нормально навантаження Н1 живиться від лінії Л1 від джерела Д1 (рис. 6.1.5). При вимиканні лінії Л1 після перемикачів живлення навантаження Н1 проводиться від джерела Д2 по лінії Л2.

За способом заземлення нейтралі розрізняють: □ мережу з ізольованою нейтраллю; □ мережу з компенсованою нейтраллю; □ мережу з глухозаземленою нейтраллю.

6.1.4 Напруги електричних мереж

Напруги електричних мереж стандартизовані. Стандартний ряд номінальних напруг, тобто середніх міжфазних робочих напруг, має такий вигляд: 0,22; 0,38; 0,66; 6; 10; 20; 35; 110; 220; 330; 500; 750; 1150 кВ. У процесі експлуатації мають місце відхилення від номінальної напруги, обумовлені втратою напруги в елементах електричної системи. Номінальною напругою приймачів електроенергії, генераторів і трансформаторів називається та напруга, на яку вони розраховані в умовах нормальної роботи.

Кожна електрична мережа характеризується номінальною напругою приймачів електроенергії, які від неї живляться. Насправді ж електроприймачі працюють при напрузі, яка дещо відрізняється від номінальної через те, що при навантаженні в лініях мереж мають місце втрати напруги.

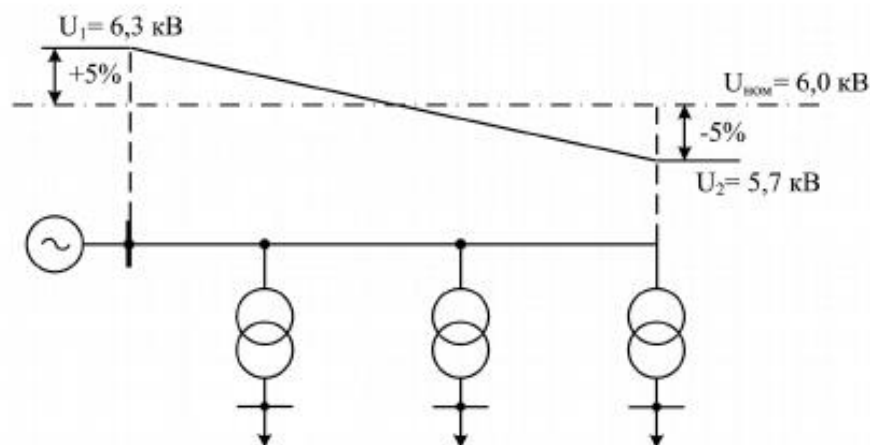


Рис. 6.1.6

При нормальному режимі роботи мережі підведена до електроприймачів напруга не повинна відрізнятися від номінальної напруги більш як на $\pm 5\%$. Це означає, що U_1 – напруга на початку лінії з розподіленням по її довжині навантаженням не повинна перевищувати $U_{\text{ном}}$ більш як на 5% , а U_2 – напруга наприкінці лінії – не повинна бути нижче $U_{\text{ном}}$ більш як на 5% (рис. 6.1.6). За номінальну напругу мережі приймається її середня напруга:

Отже, номінальна напруга мережі чисельно дорівнює номінальній напрузі електроприймачів.

Номінальна напруга генераторів за умови компенсації втрат напруги в мережі приймається на 5% більше номінальної напруги мережі.

Номінальні напруги трансформаторів встановлюються для первинних і вторинних обмоток при холостому ході. Первинна обмотка трансформатора являє собою приймач електричної енергії і тому для підвищувальних трансформаторів її номінальна напруга дорівнює номінальній напрузі генераторів, а для понижувальних – номінальній напрузі мережі.

Напруга вторинних обмоток трансформаторів, які живлять мережу тієї чи іншої напруги, має бути при навантаженні на 5% вище номінальної напруги відповідної мережі.

Але через те, що при навантаженні буде мати місце втрата напруги в самому трансформаторі, номінальна напруга (тобто напруга холостого ходу) вторинних обмоток приймається на 10% вище номінальної напруги мережі. Це стосується всіх трансформаторів, крім трансформаторів малої потужності (5600 кВА і нижче), для яких номінальна напруга вторинних обмоток встановлюється на 5% вище номінальної напруги мережі з причини невеликої протяжності живлених ними мереж.

6.1.5 Режими нейтралі мереж різних напруг

Нейтраль – загальна точка обмоток генераторів або трансформаторів. Нейтралі трансформаторів трифазних електроустановок, до обмоток яких ввімкнені електричні мережі, можуть бути або заземлені (безпосередньо чи через настроєні на ємність мережі індуктивні опори), або ізольовані від землі.

Якщо нейтраль обмотки трансформатора приєднана до заземлюючого пристрою безпосередньо або через малий опір, то така нейтраль називається глухозаземленою, а мережі, приєднані до даної обмотки, – мережами з глухозаземленою нейтраллю.

Нейтраль, не приєднана до заземлюючого пристрою або приєднана до нього через великий опір приладів сигналізації, виміру і т.п., називається ізольованою нейтраллю. Мережі, що працюють у цьому режимі нейтралі, належать до мереж з ізольованою нейтраллю.

Нейтраль генератора або трансформатора, що приєднана до заземлюючого пристрою через дугогасильні реактори для компенсації ємнісного струму в мережі при однофазних замиканнях на землю, називається компенсованою нейтраллю, а мережі, приєднані до даної обмотки, – мережами з компенсованою нейтраллю.

Електрична мережа з ефективно заземленою нейтраллю – трифазна електрична мережа напругою вище 1 кВ, в якій коефіцієнт замикання на землю не перевищує 1,4. Коефіцієнт замикання на землю – відношення різниці потенціалів між непошкодженою фазою і землею в точці замикання на землю іншої або двох інших фаз до різниці потенціалів між фазою і землею в цій точці до замикання.

При однофазному замиканні на землю порушується симетрія електричної системи: змінюються напруги фаз відносно землі, з'являються струми замикання на землю, виникають перенапруги в мережах. Ступінь зміни симетрії залежить від режиму нейтралі, тобто від способу її заземлення.

Вибір режиму нейтралі в електричних мережах до 1000 В визначається головним чином безпекою обслуговування мереж, а в мережах високої напруги – безперебійністю електропостачання, надійністю роботи та економічністю електроустановок.

Розглянемо це питання стосовно мереж різних напруг.

Електричні мережі напругою до 1000 В

Згідно з «Правилами улаштування електроустановок» (ПУЕ) електроустановки напругою до 1000 В допускається виконувати як з глухозаземленою, так і з ізольованою нейтраллю. Для найбільш поширених чотирипроводових мереж трифазного струму напругою 380/220 або 220/127 В (чисельник відповідає лінійній напрузі, знаменник – фазній), з якими стикається широке коло осіб, ПУЕ вимагають глухого заземлення нейтралі (рис. 6.1.7).

Такий режим нейтралі виключає значне перевищення номінальної напруги мережі відносно землі.

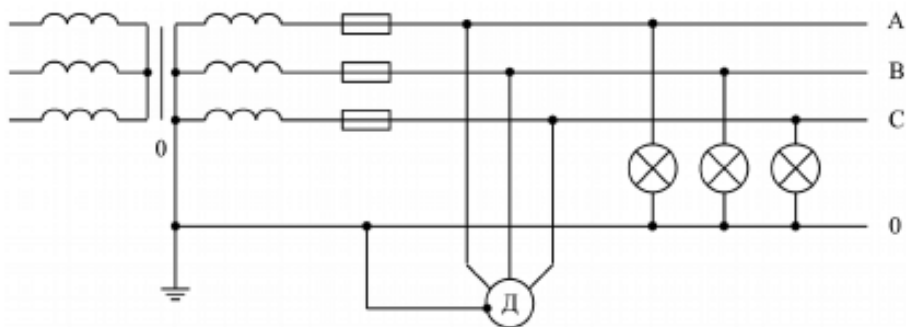


Рис. 6.1.7

Корпуси електрообладнання, приєднаного до чотирипроводової мережі, металеві каркаси розподільних щитів, приводи до електричних апаратів та інші частини електроустановок, розташованих у приміщеннях з підвищеною небезпекою (залізобетонні і цегляні підлоги, висока вологість, наявність інших ознак підвищеної небезпеки) або на відкритому повітрі, повинні мати металевий зв'язок із заземленою нейтраллю установки. Цей зв'язок здійснюється через нульовий провід, який прокладається на тих самих опорах повітряної лінії, що і фазні. У цьому разі замикання на корпус будь-якої лінії приведе до короткого замикання з досить великим струмом, запобіжник пошкодженої фази перегорить, і мережа буде продовжувати роботу в неповнофазному режимі. Напруга відносно землі двох інших фаз, які залишились у роботі, не перевищить фазну.

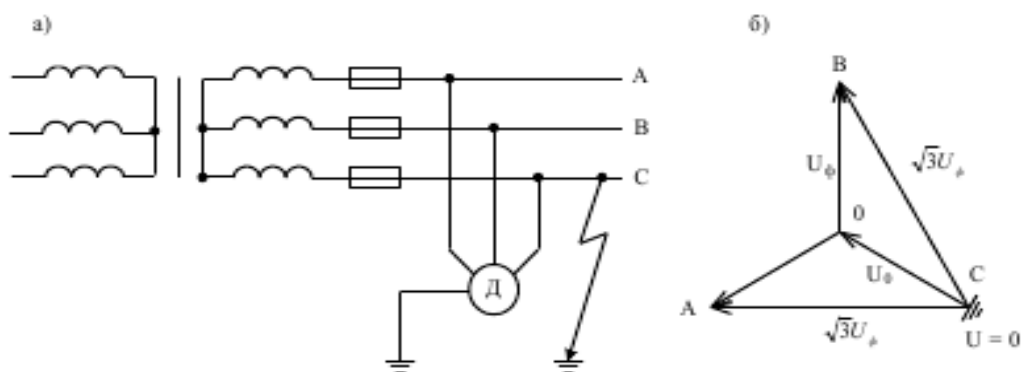


Рис. 6.1.8

При застосуванні трифазного струму з номінальною напругою 660 В, а також за підвищених вимог безпеки (наприклад на вугільних шахтах), коли протікання струму короткого замикання через землю в результаті пошкодження фазної ізоляції мережі або обладнання є небезпечним, електроустановки виконуються з ізольованою нейтраллю. Умови безпеки в цьому разі досягаються швидкою ліквідацією ненормальних режимів, що виникають у мережі.

У мережі з ізольованою нейтраллю (рис. 6.1.8, а) замикання фази на землю не викликає короткого замикання і не приводить до вимкнення пошкодженої фази. Мережа буде продовжувати роботу в повнофазному режимі, проте напруги двох непошкоджених фаз по відношенню до землі збільшаться до лінійних значень (рис. 6.1.8, б). Оскільки це створює небезпеку для персоналу, то на всіх електроустановках з ізольованою нейтраллю напругою до 1000 В і вище має бути забезпечений контроль ізоляції, швидке виявлення персоналом мережі замикань на землю і швидка їх ліквідація, а за умови підвищених вимог безпеки – автоматичне відмикання пошкодженої ділянки від мережі.

Електричні мережі напругою вище 1000 В

Електроустановки напругою вище 1000 В згідно з ПУЕ поділяються на електроустановки з малими струмами замикання на землю ($I_3 \leq 500$ А), до яких належать мережі, що працюють з ізольованою або компенсованою нейтраллю, та електроустановки з великими струмами замикання на землю ($I_3 > 500$ А), які працюють з глухозаземленою нейтраллю.

Струм однофазного замикання в мережах з ізольованою нейтраллю визначається частковими ємностями фаз мережі по відношенню до землі і залежить від напруги, конструкції і протяжності мережі. У мережах з компенсованою нейтраллю струм замикання на землю обмежується до мінімально можливих значень відповідним настроюванням дугогасильної котушки.

У мережах з глухозаземленою нейтраллю при замиканні на землю або на заземлені частини електроустановок протікають дуже великі струми замикання і тому має бути забезпечене надійне автоматичне відмикання пошкодженої ділянки мережі. Навпаки, мережі з ізольованою або компенсованою нейтраллю мають важливу перевагу – вони не вимагають негайного відмикання пошкодженої ділянки мережі при однофазних замиканнях на землю, які найчастіше зустрічаються в практиці, і можуть працювати із заземленою фазою протягом декількох годин, доки споживач не буде переведений на резервне живлення або підготовлений до припинення подачі електроенергії.

Мережі напругою до 35 кВ включно, як правило, працюють з ізольованою або компенсованою нейтраллю, а мережі напругою 110 кВ і більше – з глухозаземленою нейтраллю.

Розглянемо особливості роботи мереж при різних способах заземлення нейтралі.

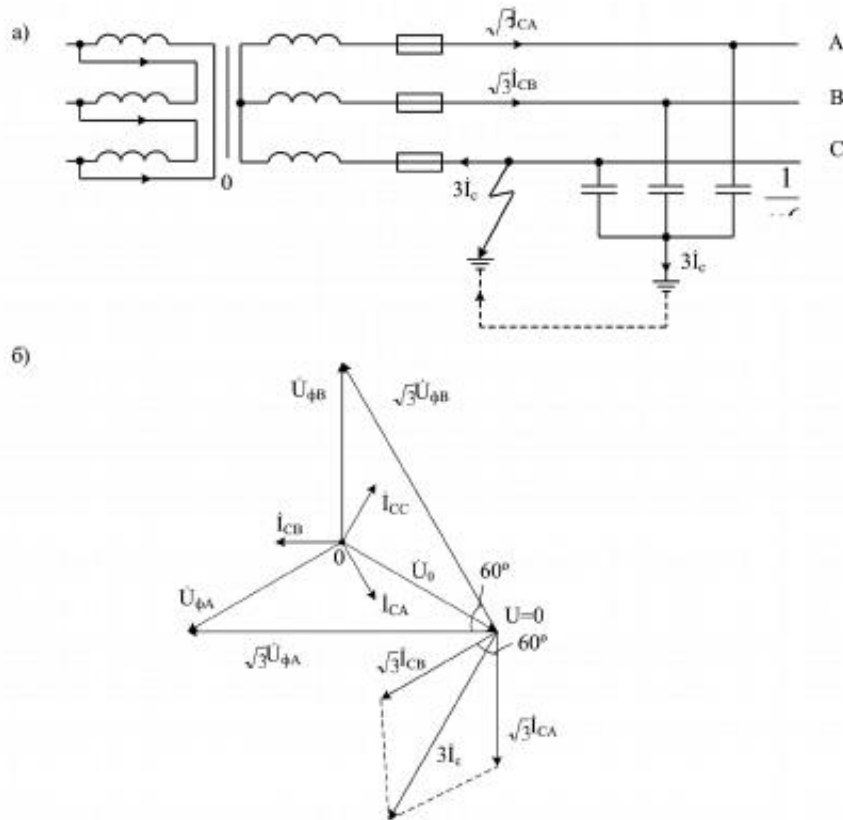


Рис. 6.1.9

Мережі з ізольованою нейтраллю. При замиканні на землю однієї фази, наприклад фази С (рис. 6.1.9, а), напруга цієї фази по відношенню до землі буде дорівнювати нулю, а напруга двох інших фаз збільшиться в $\sqrt{3}$ разів, і кут зсуву між векторами цих напруг буде 60° (рис. 6.1.9, б).

Ємнісний струм пошкодженої фази ($U_{\text{фс}} = 0$) буде дорівнювати нулю, а ємнісні струми кожної непошкодженої фази збільшаться пропорційно збільшенню напруги на ємності і відповідно будуть дорівнювати $\sqrt{3} \dot{I}_{\text{CA}}$ і $\sqrt{3} \dot{I}_{\text{CB}}$.

Сумарний струм через ємності непошкоджених фаз $3\dot{I}_{\text{C}}$, який дорівнює геометричній сумі струмів цих фаз

$$\sqrt{3} \dot{I}_{\text{CA}} + \sqrt{3} \dot{I}_{\text{CB}} = 3\dot{I}_{\text{C}},$$

буде проходити через місце замикання фази С на землю, замикаючись через джерело живлення мережі.

При неметалічному замиканні на землю ($U_{\text{фс}} \neq 0$) в місці замикання виникає дуга, яка супроводжується повторними гасіннями і запалюваннями. Між ємністю й індуктивністю мережі в цьому разі з'являються вільні електричні коливання високої частоти, внаслідок чого в мережі виникають перенапруги. Амплітуда дугових перенапруг у мережах 6-35 кВ при відсутності ферорезонансних явищ може досягати значень $3,2U_{\text{ф}}$ на непошкоджених фазах і $2,2U_{\text{ф}}$ на пошкодженій.

Короткочасні дугові перенапруги такої величини безпечні для нормальної ізоляції обладнання. Однак тривала дія перенапруг на ізоляцію мережі може привести до іонізації і теплового пробою її у будь-якій точці мережі. Крім того, наявність значного струму в дузі розвинених мереж приводить до переходу однофазних замикань у дво- та трифазні короткі замикання і до відмикання споживачів.

Мережі з компенсованою нейтраллю. Прагненню підвищити надійність роботи мереж і приєднаного до них обладнання відповідає вимога ПУЕ про те, щоб розвинені мережі напругою 6-35 кВ працювали з компенсацією ємнісного струму замикання на землю за допомогою дугогасильних котушок. Компенсація повинна здійснюватися у мережах напругою 6 і 10 кВ при струмах замикання на землю в них відповідно більше 30 і 20 А і в мережах напругою 20 і 35 кВ при струмах 15 і 10 А.

На рис. 6.1.10 подана схема найпростішої компенсованої мережі з ємнісним опором $\frac{1}{\omega C}$ на фазу. Нейтраль первинної обмотки одного з мережних трансформаторів заземлюється через регульований індуктивний опір – дугогасильну котушку – заземлюючий реактор однофазний масляний (ЗРОМ) або дугогасильний реактор (ДГР).

При замиканні на землю однієї фази в такій мережі напруга двох непошкоджених фаз по відношенню до землі, як і в мережі з ізолюваною нейтраллю, збільшується в $\sqrt{3}$ разів, а напруга нейтралі буде дорівнювати фазній напрузі (рис. 6.1.9, б). Під дією цієї напруги через дугогасильну котушку піде струм. Опір котушки підбирають таким чином, щоб індуктивний струм \dot{I}_L , що проходить через котушку, був за величиною рівний сумарному ємнісному струму $3\dot{I}_C$, який проходить через фазові ємності мережі. У цьому разі струм у місці замикання фази на землю, який являє собою геометричну суму цих двох струмів, буде рівний нулю (рис. 6.1.10, б) і отже, дуга, що виникла, погасне. Така настройка котушки з повною компенсацією ємнісного струму називається резонансною.

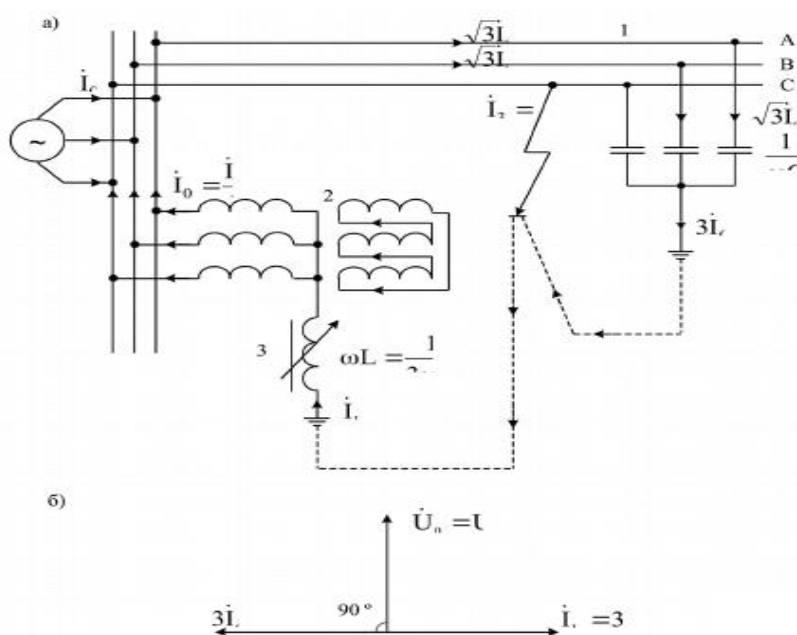


Рис. 6.1.10

Практично, однак, через місце замикання протікає залишковий струм, який складається з активної і реактивної складових. Перша з них зобов'язана своїм існуванням активному опору котушки і мережі, а друга – неточній настройці котушки. Цей залишковий струм малий за величиною. Тому у тих випадках, коли ізоляційна міцність дугового проміжку перевищує робочу напругу мережі, дуга гасне і знову не відновлюється (наприклад при грозових перекриттях лінійної ізоляції). У разі ж порушення ізоляції (поломка ізоляторів, накиди на лінію) дуга набуває перемезуючого характеру, і мережа продовжує роботу в режимі однофазного замикання, однак, на відміну від некомпенсованої мережі, з малим струмом у дузі.

У компенсованих мережах перенапруги при дугових замиканнях на землю не перевищують $(2,6-2,8)U_{\phi}$, а ймовірність появи перенапруг вищої кратності менша, ніж у некомпенсованих. Дугогасильні котушки повинні мати, як правило, резонансну настройку або невелику перекомпенсацію ($I_L \geq 3I_C$).

Компенсуючі пристрої установлюють звичайно в центрах живлення компенсованої мережі.

Мережі з глухозаземленою нейтраллю. Це, як правило, мережі 110 кВ і вище. При таких напругах ємнісні струми досягають великих значень. Застосування дугогасильних пристроїв не усунуло б основний недолік, який властивий системам з малими струмами замикання на землю: підвищення напруги в непошкоджених фазах. Глухе заземлення нейтралі усуває цей недолік, оскільки замикання однієї фази на землю є однофазним коротким, при якому здійснюється автоматичне відмикання пошкодженої лінії. При цьому рівень ізоляції апаратів нижче, оскільки напруга фаз по відношенню до землі при будь-яких режимах не вище U_{ϕ} . Виключаються також перемезувальні дуги. Немає необхідності в пристроях контролю стану ізоляції. Однак такі мережі мають і недоліки.

Перший недолік – перерви в електропостачанні. Слід зазначити, що однофазні замикання на землю в повітряних мережах 110 кВ і вище мають випадковий характер і самоликвідуються. Це дозволяє ефективно застосовувати автоматичне повторне вмикання (АПВ), яке зводить ці перерви до мінімуму.

Другий недолік. Значне ускладнення та збільшення вартості заземлюючих пристроїв. Для систем з великими струмами замикання на землю ПУЕ рекомендують $R_3 \leq 0,5$ Ом. Тобто кількість заземлюючих електродів повинна бути значною.

Третій недолік. Великі струми однофазного короткого замикання, які в окремих випадках можуть навіть перевищувати струми трифазного короткого замикання. Щоб зменшити їх величину, частину нейтралей трансформаторів у системі виконують незаземленими, збільшуючи тим самим опір для струмів однофазних замикань на землю.

6.2 КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ПОВІТРЯНИХ І КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

6.2.1 Виконання повітряних ліній

Головні елементи повітряної лінії

Головними конструктивними елементами повітряної лінії (ПЛ) є (рис. 6.2.1):

- проводи, які служать для передачі електроенергії;
- захисні троси, які монтуються у верхній частині опор для захисту лінії від атмосферних перенапруг;
- опори, які підтримують проводи і троси на певній висоті над рівнем землі (води);
- ізолятори, які ізолюють проводи від тіла опори;
- арматура, за допомогою якої проводи закріплюються на ізоляторах, а ізолятори – на опорах.

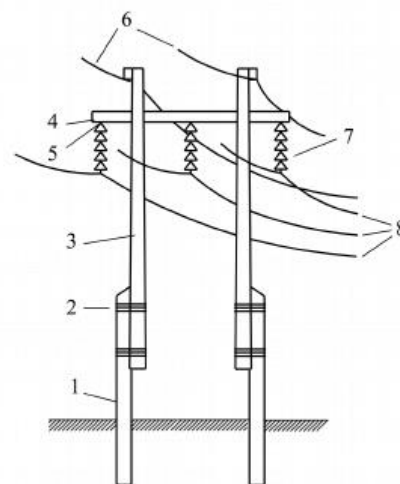


Рис. 6.2.1

Відстань між двома сусідніми опорами називають довжиною прогону або прогоном лінії (рис. 6.2.2). Під дією власної ваги провід у прогоні провисає. Вертикальну відстань між горизонтальною прямою, яка з'єднує дві розташовані на одному рівні точки кріплення, і найнижчою точкою провисання проводу називають стрілою провисання f (рис. 6.2.2). Якщо точки кріплення проводу розташовані на різних висотах, то у лінії розрізняють дві стріли провисання F і f , рівні вертикальним відстаням між найнижчою

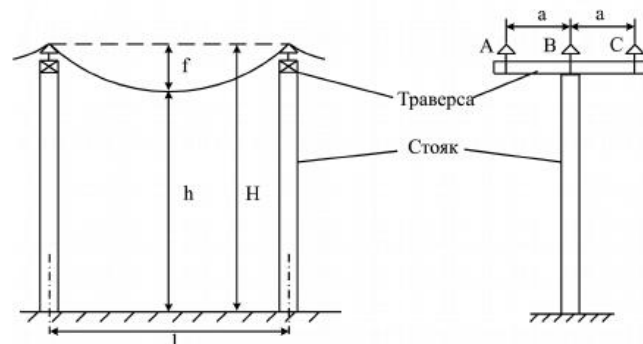


Рис. 6.2.2

точкою провисання проводу і точками його кріплення (рис. 6.2.3).

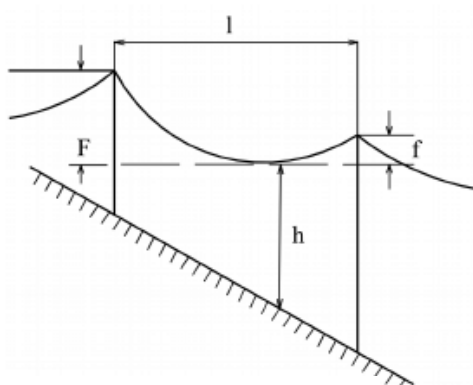


Рис. 6.2.3

Найменша відстань від найнижчої точки проводу до землі, яка називається габаритом лінії до землі h , має гарантувати безпеку руху людей і транспорту з громіздкими предметами. Ця відстань залежить від умов місцевості, напруги лінії тощо. Для ненаселеної місцевості $h = 5-7$ м, для населеної $h = 6-8$ м.

Відстань між сусідніми проводами повітряної лінії залежить головним чином від напруги лінії.

Висота опори H при горизонтальному розташуванні проводів і кріпленні їх на штирових ізоляторах визначається розміром h і максимальною стрілою провисання проводу f (рис. 6.2.2). При кріпленні проводів на гірляндах із підвісних ізоляторів (рис. 6.2.4) висота опори збільшується ще на величину довжини гірлянди ізоляторів λ .

Довжину прогону лінії звичайно визначають за економічними міркуваннями. Із збільшенням довжини прогону різко зростає стріла провисання, а отже, і висота опор, що збільшує їх вартість. Разом з тим із збільшенням довжини прогону зменшується вартість ізоляції лінії (менше опор, ізоляторів і арматури для кріплення проводів).

У лініях напругою до 1000 В відстань між проводами мала, ізоляція лінії відносно дешева, опори прості і недорогі. Тому для таких ліній економічно

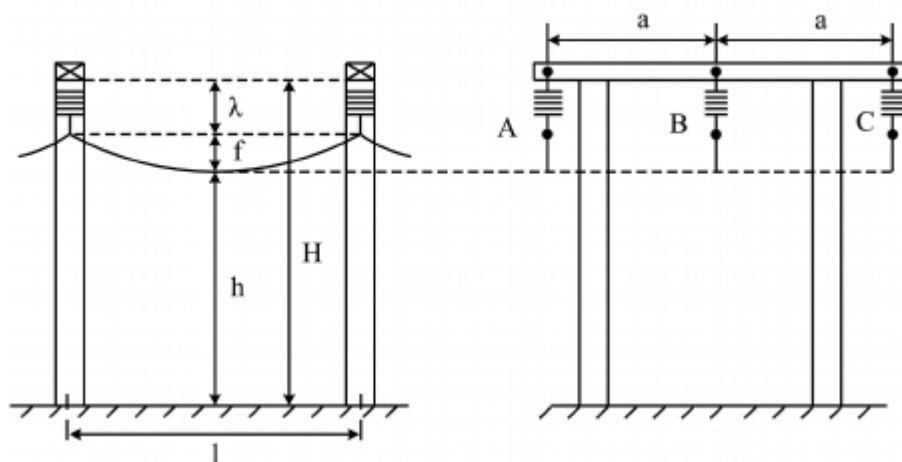


Рис. 6.2.4

доцільні порівняно невеликі довжини прогонів – дець 40-50 м при висоті опор 8-9 м.

У лініях напругою вище 1000 В економічно доцільні великі прогони, оскільки деяке подорожчання опор окупається подешевшанням ізоляції ліній. Наприклад, у лініях 110 кВ на дерев'яних опорах довжина прогону звичайно складає 150-200 м при стрілі провисання проводів 4-5 м і висоті опор з горизонтальним розташуванням проводів 13-14 м.

При переходах повітряних ліній через судноплавні річки довжини прогонів досягають 1 км і більше. При цьому різко зростає висота опор, досягаючи в окремих випадках декількох десятків метрів.

Найбільше поширення отримали одноколові і двоколові повітряні лінії. Під поняттям коло розуміють три проводи однієї трифазної лінії.

За початок і кінець повітряної лінії приймають лінійні портали розподільних пристроїв.

Проводи і троси

Для повітряних ліній використовують неізольовані (голі) проводи.

Проводи і троси для зменшення втрат потужності і напруги в мережі повинні мати якомога менший електричний опір.

Поряд з цим проводи і троси, які працюють на відкритому повітрі у важких атмосферних умовах, мають бути механічно міцними і повинні протистояти атмосферним явищам і хімічним діям домішок, які знаходяться в повітрі.

За умови забезпечення достатньої механічної міцності на магістральних ділянках ліній до 1кВ, лінійних відгалуженнях і відгалуженнях до введів у будівлі (споруди) ПУЕ вимагає застосовувати багатодотові проводи з мінімальним перерізом, не меншим за мінімально допустимі перерізи проводів ПЛ вище 1кВ за умовами механічної міцності.

Механічне навантаження на провід визначається власною вагою проводу, вагою ожеледі і тиском вітру на провід. Так, наприклад, вага 1м алюмінієвого проводу перерізом 150 мм² дорівнює близько 0,42 кг, а додаткові навантаження на нього можуть складати: від ожеледі – 5-10 кг, від вітру – (0,75-1,0) кг на 1 м довжини проводу.

Для повітряних ліній використовують алюмінієві, сталєалюмінієві і сталеві проводи, а в окремих випадках – проводи зі спеціальних сплавів алюмінію–альдрею та ін. Грозозахисні троси виконують, як правило, зі сталі. За конструктивним виконанням розрізняють однодротові і багатодотові проводи.

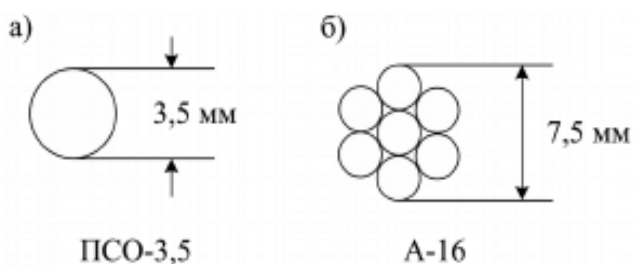


Рис. 6.2.5

Однодротовий провід складається з одного круглого дроту (рис. 6.2.5, а). Багатодотовий провід з одного металу складається (залежно від перерізу проводу) із 7, 19 і 37 скручених між собою окремих дротів (рис. 6.2.5, б).

Багатодотовий провід з двох металів (як правило, сталі й алюмінію) складається зі сталєвої жили (однодротової або скрученої з 7 чи 19 дротів), навколо якої розміщена алюмінієва частина, що складається з 6 чи 28 дротів.

Алюмінієві проводи мають малу механічну міцність, що не дозволяє сильно їх натягати. Щоб запобігати виникненню в прогонах великих стріл провисання, доводиться зменшувати відстань між опорами, а це здорожує лінію.

Алюмінієві проводи застосовують звичайно в лініях місцевих мереж при прогонах не більш як 100 – 125 м.

Для збільшення механічної міцності алюмінієвих проводів їх виготовляють багатодотовими із твердотягнутих дротів.

Сталеві проводи мають велику механічну міцність як однодротові, так і багатодотові. Питомий електричний опір сталевих проводів значно більший, ніж алюмінієвих. Сталеві проводи застосовуються у місцевих мережах при передачі порівняно невеликих потужностей. Головним недоліком сталевих проводів і тросів є їх схильність до корозії, для запобігання якої їх оцинковують.

Випускають дві марки багатодровових сталевих проводів ПС (провід сталевий) і ПМС (провід зміднений сталевий). Сталеві грозозахисні троси мають марки ТК-35, ТК-50 і ТК-70.

Однодротові сталеві проводи виготовляють діаметром не більш як 5мм. Алюмінієві однодротові проводи взагалі не виготовляються через їх низьку міцність. Сталеалюмінієві проводи мають той же питомий опір, що й алюмінієві проводи рівного їм перерізу.

Сталеалюмінієві проводи широко застосовуються в мережах напругою 35-110 кВ і вище.

Проводи з альдрею мають приблизно такий же електричний опір, що й алюмінієві, проте вдвічі більшу механічну міцність. Недолік таких проводів – їх мала стійкість проти вібрації.

Промисловість випускає проводи відрізками певної довжини (будівельна довжина). На лініях передачі ці відрізки проводів з'єднують один з одним спеціальними затискачами шляхом обтиснення або опресування. Останнім часом розроблений новий спосіб з'єднання проводів термічним зварюванням.

За допомогою термічного зварювання роблять з'єднання проводів, яке не змінює протягом часу своїх електричних характеристик і є досить міцним.

Проводи маркуються за допомогою літер і цифр, що вказують відповідно матеріал і площу поперечного перерізу. Наприклад, М-120 – мідний провід перерізом 120 мм², ПС-25 – провід сталевий перерізом 25 мм². До позначення комбінованих проводів входять декілька літер та чисел, що вказують матеріал та площу перерізу осердя та повитих дровових рядів (наприклад, АС-70/11 – сталеалюмінієвий провід зі сталевим осердем площею 11 мм² та алюмінієвими повитими рядами площею 70 мм²). Якщо міждротовий простір усього проводу захищений нейтральною замазкою, у позначенні проводу додаються літери КП (наприклад АСКП-120/19), а якщо замазкою захищене лише сталеве осердя, то додаються літери КС (наприклад АСКС-150/19). Провід із осердем, покритим плівкою, позначають АСК (наприклад АСК- 185/24). Провід, скручений з дровів не обробленого термічно алюмінієвого сплаву, позначають АН, а такий же термооброблений – АЖ.

Опори

Розміщення проводів і тросів на опорах. Розміщення проводів на опорах, яке найчастіше зустрічається, схематично зображене на рис. 6.2.6. Там же вказане й можливе розміщення захисних тросів, якщо лінію виконують з тросами. Розміщення проводів по вершинах трикутника широко розповсюджене на лініях до 20 кВ і на одноколових лініях 110 кВ на металевих і залізобетонних опорах. Горизонтальне розташування проводів застосовують на лініях 35 і 110 кВ з дерев'яними опорами і на лініях більш високої напруги з металевими опорами.

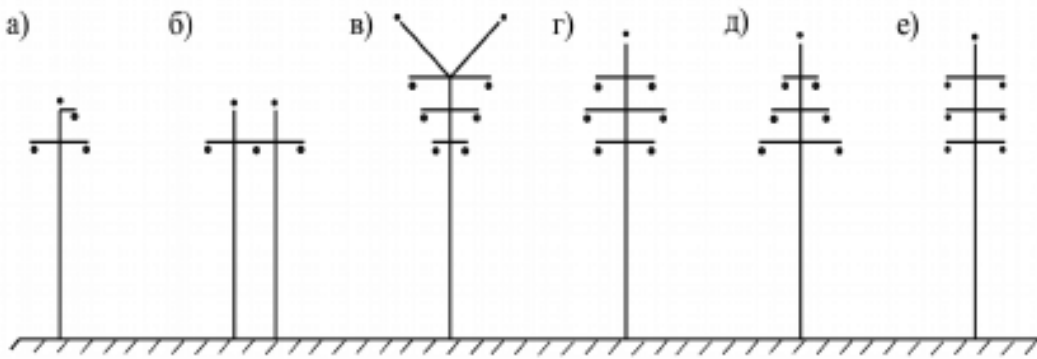


Рис. 6.2.6

На двоколових лініях проводи розміщують зворотною ялинкою, шестикутником або прямою ялинкою.

Для всіх зазначених варіантів характерне несиметричне розміщення проводів по відношенню один до одного, що тягне за собою неоднаковість їх реактивних опорів і провідностей. Тому і спади напруги в окремих фазах лінії будуть неоднаковими при рівномірному завантаженні фаз, що веде до несиметрії напруг на лінії.

Для того, щоб зробити ємність та індуктивність усіх трьох фаз кола лінії однаковими, на довгих лініях застосовують транспозицію проводів, тобто

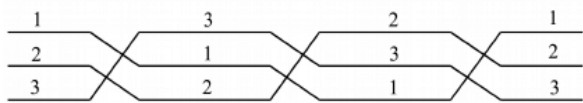


Рис. 6.2.7

змінюють їх розміщення відносно один одного на різних ділянках лінії (рис. 6.2.7). Транспозиція проводів має також на меті зменшення впливу лінії електропередачі на сусідні проводи зв'язку.

Застосовують транспозицію на лініях напругою 110 кВ і вище протяжністю більше 100 км. Зміна порядку розташування проводів на опорах здійснюється на транспозиційних опорах.

Види опор. Опори бувають анкерними, проміжними, наріжними, транспозиційними і спеціальними. Застосування того чи іншого виду опор диктується їх призначенням, яке у свою чергу залежить від місця їх установлення на трасі лінії.

Анкерні опори встановлюють з метою жорсткого закріплення проводів в особливо відповідальних точках лінії (на кінцях лінії, на кінцях прямих її ділянок, на перетинах особливо важливих інженерних споруд тощо). Анкерні опори значно складніші і дорожчі за проміжні, мають більший запас міцності і розраховуються для нормального й аварійного режимів (обрив одного або декількох проводів). Тому їх кількість на кожній лінії має бути мінімальною. Відстань між анкерними опорами нормами не обмежується.

Проміжні опори служать для підтримання проводу на прямих ділянках лінії в анкерному прогоні. На проміжних опорах проводи підвішуються за

допомогою підтримуючих гірлянд ізоляторів. Проміжна опора дешевша за опори інших типів і простіша у виготовленні, оскільки завдяки однаковому тяжінню проводів з обох боків вона в нормальному режимі (тобто з проводами, що необірвані) не зазнає зусиль уздовж лінії. Проміжні опори складають не менше 80-90 % загальної кількості опор лінії. Тому при проектуванні повітряних ліній треба звертати особливу увагу на вибір найекономічнішого типу проміжних опор.

Наріжні опори встановлюють у точках повороту лінії. Найчастіше застосовують наріжні опори анкерного типу.

Спеціальні опори бувають двох типів: перехідні – для великих прогонів (перетин річок, ущелин, озер) і відгалужувальні – для тих випадків, коли вимагається глухе відгалуження від лінії.

Опори повітряних ліній виготовляються з дерева, металу і залізобетону.

Дерев'яні опори прості у виготовленні і дешеві. Найпоширеніші соснові опори, дещо менш поширені опори з модрина.

Недолік цих опор – їх недовговічність, що пояснюється гниттям деревини. Просочення деревини спеціальними антисептиками збільшує строк служби дерев'яних опор з 4-6 до 15-25 років. Крім того, опори в більшості випадків роблять складовими (рис. 6.2.8).

Нога опори складається з двох частин: довгої (основного стояка) і короткої (пасинка). Пасинок з'єднують із стояком двома бандажами зі сталевого дроту. У ґрунт залізобетонний пасинок розміщують на глибину 1,8-2,3 м.

Дерев'яні опори ліній напругою до 20 кВ виготовляють одностояковими, ізолятори закріплюють на гаках (рис. 6.2.8, а). Для проводів середніх перерізів застосовують кріплення ізоляторів на штирях (рис. 6.2.8, б). На лініях напругою 110 кВ і на більшості ліній напругою 35 кВ установлюють двостоякові опори П-подібного типу (рис. 6.2.1).

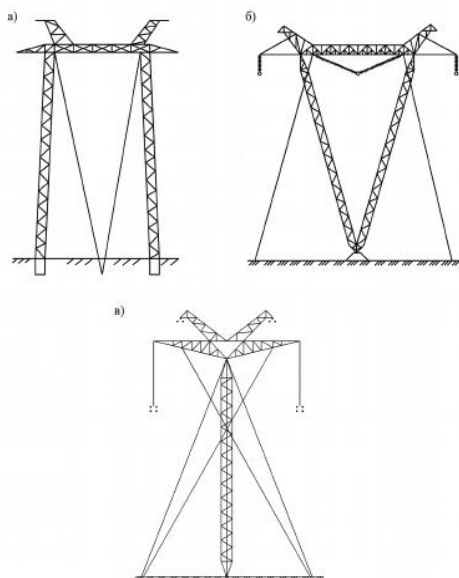


Рис. 6.2.9

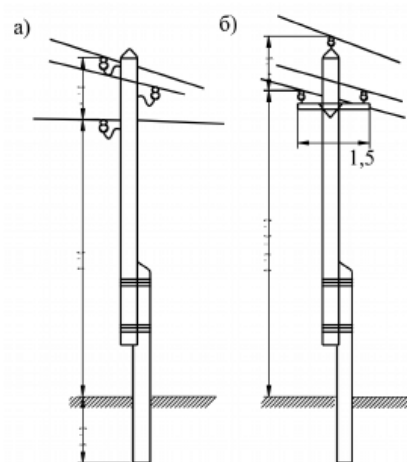


Рис. 6.2.8

Металеві опори знайшли застосування на лініях напругою 35 кВ і вище. Їх виготовляють із сталі спеціальних марок. Окремі елементи опори з'єднують зварюванням або болтами. Незалежно від конструктивного рішення й схеми металеві опори виконуються у вигляді просторових гратчастих конструкцій (рис. 6.2.9, 6.2.10).

Для запобігання окислюванню поверхню опор оцинковують або періодично фарбують спеціальними фарбами. Установлюють металеві опори на

залізобетонних фундаментах.

Залізобетонні опори довговічніші за дерев'яні, вимагають менше металу, ніж металеві, прості в обслуговуванні, тому в останні роки отримали широке застосування (рис. 6.2.11).

Найбільше розповсюдження отримали одностоякові проміжні залізобетонні опори з металевими траверсами.

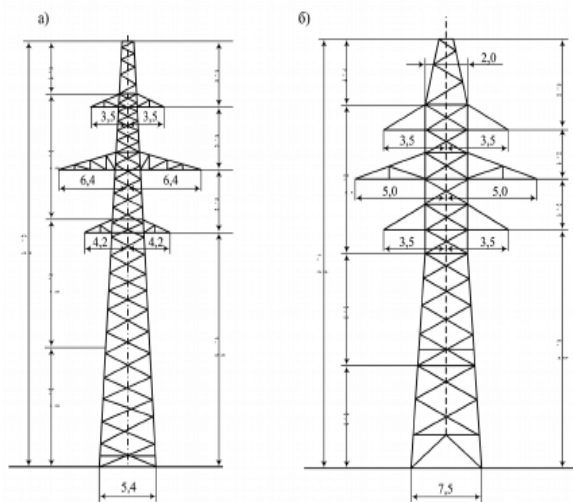


Рис. 6.2.10

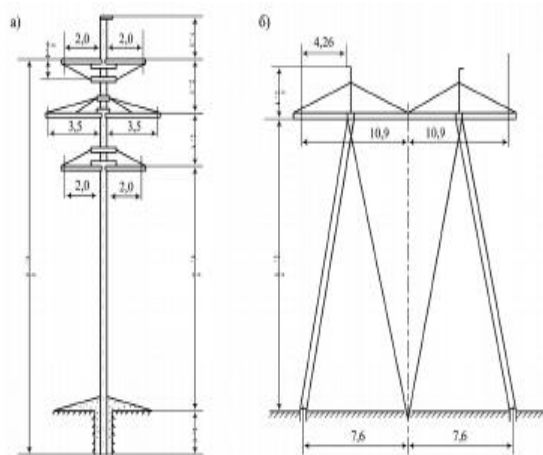


Рис. 6.2.11

Ізолятори

Лінійні ізолятори виготовляють з фарфору і загартованого скла. Ізолятори розподіляють на штирові і підвісні. Штирові ізолятори (рис. 6.2.12, а, б) застосовують на лініях напругою до 35 кВ включно. Вони складаються з двох фарфорових елементів, з'єднаних за допомогою цементуючої замазки. Їх кріплять на сталевих штирях або крюках.

В умовному позначенні ізолятора літера і цифра означають: Ш – штировий; Ф(С) – фарфоровий (скляний); цифра – номінальна напруга, кВ; остання літера А, Б, В – виконання ізолятора.

Провід кріплять на ізоляторі за допомогою в'язки з м'якого обпаленого дроту того ж матеріалу, що і сам провід.

Підвісні ізолятори застосовуються двох типів: тарілчасті і стержневі.

Підвісні ізолятори (рис. 6.2.12, в) застосовують на лініях напругою 35 кВ і вище. Вони складаються з фарфорової або скляної ізолювальної частини 1 і металевих деталей – шапки 2 і стержня 3, що з'єднуються з ізолювальною частиною за допомогою цементної замазки 4. Це тарілчасті ізолятори.



Рис. 6.2.12

Стержневі підвісні ізолятори являють собою суцільний фарфоровий стержень з ребрами, армований зверху і знизу металевими шапками з

конічними внутрішніми поверхнями. При їх використанні досягається значна економія металу.

Основний недолік стержневих ізоляторів – обрив проводу при руйнуванні ізолятора електричною дугою або механічній дії. Тарілчасті ж ізолятори, навіть під час електричного пробою, як правило, здатні нести механічне навантаження. Для ізоляції лінії електропередачі (ЛЕП) напругою 6-20 кВ достатньо одного підвісного ізолятора.

Для ізоляції ліній напругою 35 кВ і вище підвісні ізолятори збирають в гірлянди (рис. 6.2.13). Гірлянди підвішені вертикально на проміжних опорах, навантажені вагою проводів та можливими на них опадами, називаються підтримувальними. Гірлянди на анкерних, кутових і кінцевих опорах, які розташовані близько до горизонталі через великі поздовжні зусилля натягнених проводів, називаються натяжними.

Кількість ізоляторів у гірлянді визначається типом ізолятора, номінальною напругою лінії, матеріалом опори і розташуванням гірлянди. У натяжних гірляндах кількість ізоляторів береться на один більше, ніж у підтримувальних, оскільки натяжні гірлянди зазнають більших механічних навантажень і ймовірність пошкодження ізоляторів у цих гірляндах вища.

Для різних умов роботи призначені різні типи підвісних ізоляторів. Так, ізолятори типів П і ПМ (П-підвісний, М-малогабаритний) застосовують у звичайних атмосферних умовах, ізолятори типу ПР використовують у підтримувальних, а ізолятори типів НС і НЗ – у натяжних гірляндах ліній, прокладених у районах з підвищеною забрудненістю повітря.

Лінійна арматура для кріплення проводів до ізоляторів й ізоляторів до опор ділиться на такі основні види: затискачі, застосовувані для закріплення проводів у гірляндах підвісних ізоляторів; зчіпна арматура для підвіски гірлянд на опорах і з'єднання гірлянд одна з одною, а також з'єднувачі для з'єднання проводів і тросів у прогоні (рис. 6.2.13).

Зчіпна арматура включає скоби, серги й вушка. Скоба служить для приєднання гірлянди до траверси опори або до деталей, що закріплюються на траверсі. Підтримувальна гірлянда ізоляторів (рис. 6.2.13, а) закріплюється на траверсі проміжної опори за допомогою серги 1. Серга з одного боку з'єднується зі скобою або з деталлю на траверсі, а з іншого боку

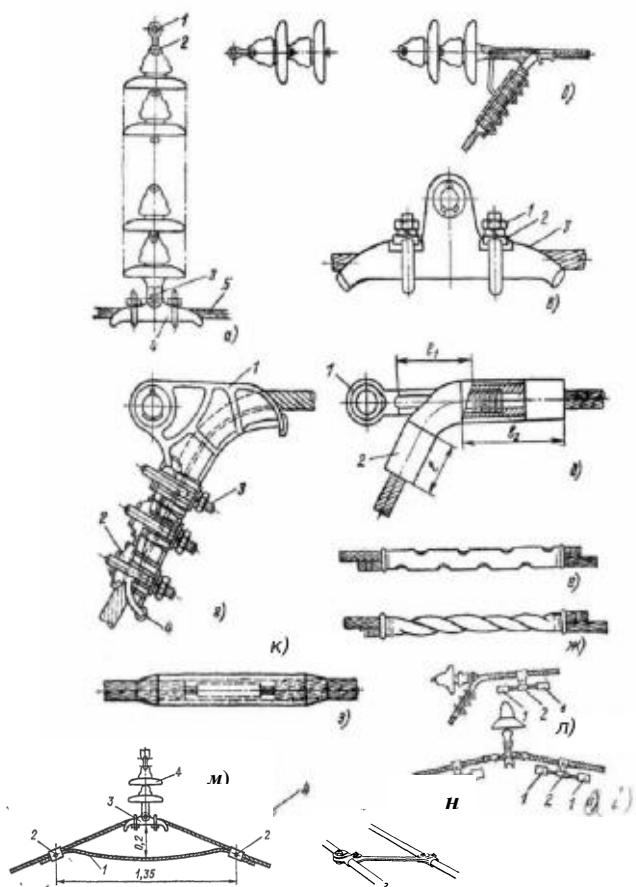


Рис. 6.2.13

вставляється в шапку верхнього ізолятора 2. До нижнього ізолятора гірлянди за вушко 3 прикріплений підтримувальний затискач 4, у якому розміщений провід 5.

Підтримувальні затискачі підвішуються на проміжних опорах, натяжні – на анкерних. Підтримувальний глухий затискач показаний на рис. 6.2.13, в. Натискні болти 1 через плашку 2 притискають провід до корпусу затискача 3 і утримують його на місці при однобічному тяжінні.

Сталеалюмінієві проводи перерізом до 95 мм² включно закріплюються в з'єднувачах методом скручування (рис. 6.2.13, ж). Овальні з'єднувачі (рис. 6.2.13, е, ж) застосовуються для проводів перерізом до 185 мм² включно. У них проводи укладаються внахльст, після чого здійснюється обтиснення з'єднувача за допомогою спеціальних кліщів. Пресовані з'єднувачі використовуються для з'єднання проводів перерізом 240 мм² і більше й сталевих тросів усіх перерізів. Ці затискачі переважно складаються з двох трубок: однієї сталеві для з'єднання внутрішніх сталевих жил та іншої – алюмінієвої, що накладається поверх першої жили і тієї, що служить для з'єднання зовнішніх алюмінієвих жил (рис. 6.2.13, к).

До проводів лінії підвішуються гасителі вібрації або демпфувальні петлі, застосування яких зменшує вібрацію й дозволяє запобігти зламу дротів проводів. Гаситель вібрації (рис. 6.2.13, л) складається з двох чавунних вантажів 1, з'єднаних сталевим тросом 2. Для проводів малих перерізів захист від вібрації здійснюється за допомогою демпфувальної петлі 1 (рис. 6.2.13, м) з проводу тієї ж марки. Петля прикріплюється до проводу болтовими затискачами 2 по обидва боки підтримувального затискача 3 у підвісній гірлянди ізоляторів 4.

На проводах ПЛ 330-750 кВ застосовують розпірки 1 (рис. 6.2.13, н) для фіксації проводів розщепленої фази відносно один одного. Вони забезпечують необхідну відстань між окремими проводами фаз та захищають їх від схльостування, зіткнення й закручування.

Останнім часом знайшли застосування полімерні ізолятори. Основними елементами таких ізоляторів є стержень з односпрямованого склопластику, захисна полімерна оболонка і металеві кінцівки. Полімерні ізолятори міцніші, надійніші і легші фарфорових та скляних, однак значно дорожчі. При їх застосуванні транспортні витрати зменшуються в 10-11 разів, у 4 рази – витрати при монтажу.

6.2.2 Кабельні лінії

Кабельні лінії (КЛ) змінного струму значно дорожчі за повітряні лінії тієї ж напруги, більш трудомісткі у спорудженні, вимагають більшого строку для ремонту і більш кваліфікованого персоналу. Тому кабельні лінії прокладають, як правило, лише там, де спорудження повітряних ліній неможливе або небажане, наприклад, у містах і населених пунктах, на території промислових підприємств, через великі водоймища, а також у місцях, які вимагають маскування.

Переваги кабельних ліній порівняно з повітряними: недоступність кабелю для сторонніх осіб, невіддільність атмосферним діям, можливість широкого розвитку електропостачання споживачів проектованого району.

Головні елементи кабельної лінії:

- кабель, що служить для передачі електроенергії;
- з'єднувальні муфти, за допомогою яких окремі будівельні довжини кабелів з'єднуються в одну лінію;
- кінцеві муфти (воронки);
- стопорні муфти, які монтуються на крутих ділянках траси лінії для запобігання стіканню кабельної маси;
- кабельні споруди (кабельні колектори, тунелі, канали, шахти, колодязі, підживлювальні пункти), спеціально застосовувані на окремих ділянках кабельних ліній, коли прокладання у природному ґрунті виключається.

За початок і кінець кабельної лінії приймають кабельні наконечники кінцевих муфт (воронки).

За умовами прокладання і монтажу з'єднувальних і кінцевих муфт трифазні кабелі напругою 1-10 кВ мають найбільші перерізи струмовідних жил до 240 мм². У разі, коли переріз одного кабелю недостатній, лінію виконують з декількох кабелів.

Основними складовими частинами силового кабелю є:

- струмовідні жили;
- ізоляція або ізолювальні оболонки, які відокремлюють струмовідні жили одну від одної і від землі;
- захисна оболонка, яка оберігає ізоляцію від шкідливої дії вологи, кислот і механічних пошкоджень.

Струмовідні жили бувають основними й нульовими. Основні жили застосовуються для передачі по них електроенергії. Нульові жили призначені для протікання різниці струмів фаз при нерівномірному їх навантаженні. Струмовідні жили, які виготовляються з мідного або алюмінієвого дроту, бувають як однодротовими (перерізом жил до 16 мм²), так і багатодротовими.

Струмовідні жили багатожилевих кабелів напругою до 10 кВ включно і перерізом жил 25 мм² і вище мають секторну або сегментну форму. Застосування жил такої форми значно зменшує діаметр кабелю і витрати на ізоляцію та захисні оболонки. Перерізи силових кабелів показані на рис. 6.2.14.

Ізоляцію струмовідних жил кабелів виконують з кабельного паперу, шари якого накладають у вигляді стрічок на жили кабелю. Товщина ізоляції залежить від робочої напруги кабелю. Після накладення ізоляції кабель просочують ізоляційною

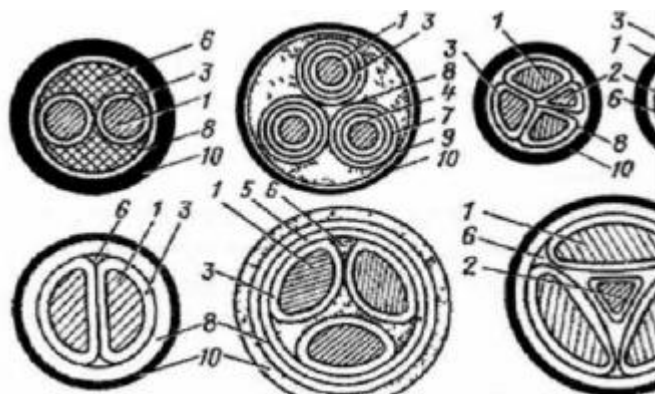


Рис. 6.2.14

сумішшю, що різко збільшує електричну міцність ізоляції. Застосовують також кабелі з гумовою і пластмасовою ізоляцією.

Кабелі напругою 10 кВ виготовляють також з поліетиленовою ізоляцією.

Екрани використовують для захисту зовнішніх кіл від впливу електромагнітних полів струмів, що протікають по кабелю, і для забезпечення симетрії електричного поля навколо жил кабелю.

Захисні оболонки, які накладаються поверх ізоляції, бувають свинцевими, алюмінієвими і поліхлорвініловими. Свинцеві оболонки, застосовувані в кабелях усіх напруг, вологонепроникні, гнучкі і прості у виготовленні, але важкі і не досить стійкі у вібраційному відношенні.

Широко застосовувані останнім часом алюмінієві оболонки у 2-3 рази міцніші і в 4 рази легші за свинцеві, але вони мають малу корозійну стійкість. Крім того, вони не досить гнучкі.

Оболонки всіх видів мають бути захищені від механічних пошкоджень. Для цього на оболонку накладають спочатку прошарок з кабельного просоченого сульфатного паперу або просоченої пряжі, а потім броню з двох сталевих стрічок або сталевого оцинкованого дроту. Для захисту броні від корозії її покривають двома шарами кабельної пряжі, просоченої бітумом, і крейдяною сумішшю.

Трижильні кабелі напругою до 10 кВ включно виготовляють із секторними жилами і забезпечують паперовою ізоляцією та свинцевою або алюмінієвою оболонкою. Кожну з трьох жил, яка складається з окремих дротів, обмотують у декілька шарів ізоляцією – просоченими стрічками кабельного паперу.

Ізольовані таким чином жили скручують одну з одною, а простір між жилами заповнюють паперовими джгутами із сульфатного паперу. Заповнювачі призначені для усунення вільних проміжків між елементами кабелю з метою герметизації, додання необхідної форми й механічної стійкості конструкції кабелю. Поверх жил накладають загальну поясну ізоляцію тієї ж структури, що і фазна ізоляція жил.

Призначення поясної ізоляції – забезпечити, щоб кабель, прокладений в мережі з ізольованою нейтраллю, мав приблизно однакову електричну міцність як між фазами, так і між будь-якою фазою і землею. Це важливо, бо в разі замикання на землю однієї з фаз кабелю дві інші фази отримують по відношенню до землі лінійну напругу.

Маркування кабелів відповідає їх конструкції. Кабелі з паперовою ізоляцією й алюмінієвими жилами мають марки ААГ, ААБ, АСГ, де перша буква позначає матеріал жил (А – алюміній), друга – матеріал оболонки (А – алюміній, С – свинець), третя буква – відсутність захисних покриттів (Г – «голий»). Броньовані кабелі мають у марці букву Б (броня). У марках кабелів з мідними жилами букви, що позначають назву матеріалу, не ставляться.

Окремі відрізки кабелів з'єднують за допомогою з'єднувальних муфт. Для приєднання кабелів до шин розподільних устаткувань служать кінцеві воронки і кінцеві муфти. Їх головне призначення – герметизація кабелів у

місцях з'єднань і кінцівок. При транспортуванні, зберіганні і прокладенні кабель має бути герметизований. Тому із заводу його випускають із запаяними кінцями. Розробляти кінці кабелю слід безпосередньо перед монтажем муфт.

Для кабелів напругою до 1000 В застосовують, як правило, чавунні з'єднувальні муфти (рис. 6.2.15).

Монтаж муфти розпочинають із того, що розробляють кінці кабелю. Для цього з ділянки кабелю певною довжини знімають верхні покриття (пряжу, броню, захисну оболонку). Потім зачищені від ізоляції кінці жил з'єднують один з одним шляхом паяння або зварювання, ізолюють і укладають у чавунну з'єднувальну муфту, обидві половини якої стягують болтами. Після цього через отвір у верхній половині муфти заливають розігріту кабельну масу. Коли вона повністю захолоне і затвердіє, кришку муфти ставлять на місце і закріплюють болтами.

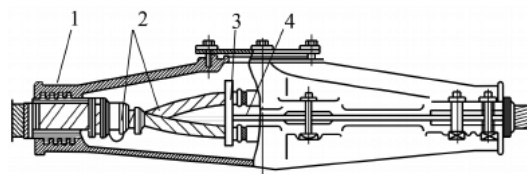


Рис. 6.2.15

Чавунна муфта не досить герметична, при низьких напругах з цим не рахуються. При більш високих напругах проникнення вологи в муфту неприпустиме, це змушує застосовувати свинцеві з'єднувальні муфти, які мають герметичність.

Свинцева муфта (рис. 6.2.16) служить для з'єднання кабелів із свинцевими та алюмінієвими оболонками. Вона являє собою свинцеву трубу, яка насувається на місце з'єднання розроблених та ізольованих жил кабелю. Кінці труби припаюють до оболонки кабелю. Простір усередині муфти заповнюють кабельною масою. Для захисту від механічних пошкоджень свинцеву муфту укладають у чавунну або пластмасову оболонку.

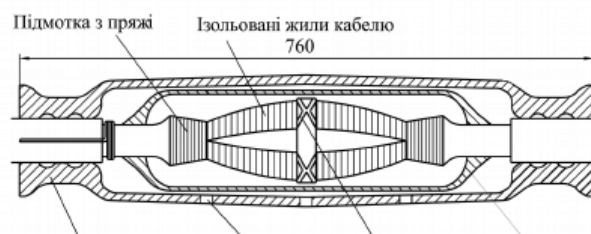


Рис. 6.2.16

Для з'єднання кабелів у тунелях, каналах і колекторах застосовують епоксидні муфти. Епоксидний компаунд заливають у тимчасову форму, після його затвердіння форму прибирають. Епоксидні муфти герметичні, прості у виготовленні, мають невеликі розміри і високу електричну міцність.

Для окінцювання кабелів напругою до 10 кВ у приміщеннях застосовують кінцеві воронки і сухі розділки, а на відкритому повітрі – кінцеві муфти.

Кінцеві воронки (рис. 6.2.17) з тонкої листової сталі після розроблення жил кабелю заливають розігрітою кабельною масою; вони прості у виготовленні і надійні в роботі, але займають багато місця.

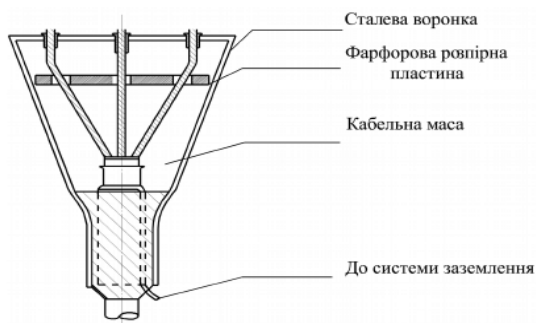


Рис. 6.2.17

При сухій розділці розроблені жили кабелю обмотують ізольованою стрічкою і лакують. Можливі й інші способи сухих розділок кабелів. Суха розділка менш громіздка і пожежонебезпечна порівняно з кінцевою воронкою. Епоксидні кінцеві розділки (рис. 6.2.18) виробляють так само, як і епоксидні з'єднувальні муфти, вони мають такі самі переваги.

При розробленні кінців кабелів на відкритому повітрі застосовують кінцеві муфти з фарфоровими ізоляторами. На рис. 6.2.19 наведена мастиконаповнена кінцева муфта зовнішньої установки з фарфоровими ізоляторами для кабелів напругою до 10 кВ.



Рис. 6.2.18

Останнім часом створена універсальна система кінцевих муфт внутрішньої і зовнішньої установки для кабелів з паперовою або пластмасовою ізоляцією – термоусаджувальні муфти. Надійна герметизація досягається за допомогою спеціальних клейових і мастикових герметиків. Одночасно з нагріванням термоусаджувальних трубок відбувається розплав і розтікання герметизуючих матеріалів, що створює від наконечника до зовнішнього покриття кабелю поверхню, повністю загерметизовану зсередини.

Поза будівлями кабельні лінії звичайно прокладають у траншеї (рис. 6.2.20). Глибина прокладання кабелів 0,7-1 м, ширина траншеї залежить від кількості прокладуваних кабелів. Якщо поблизу траси кабелів можливі земляні роботи, то для захисту від механічних пошкоджень поверх кабелів укладають цеглу.

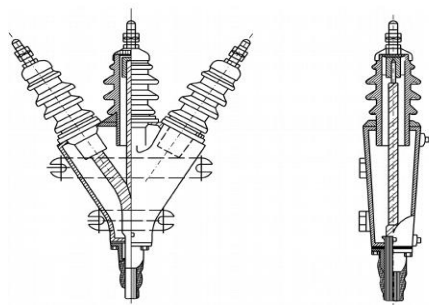


Рис. 6.2.19

У разі перетину кабельною лінією залізниць, автомобільних доріг її

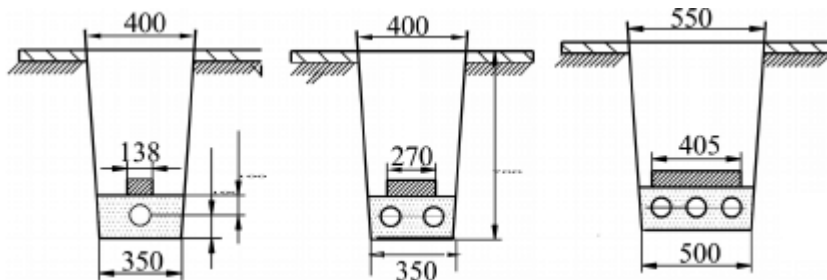


Рис. 6.2.20

прокладають в азбестоцементних або бетонних трубах. Таке прокладання захищає кабель від вібрації і робить можливим ремонт його без розкриття доріг.

При великій кількості паралельно прокладуваних кабелів, а також у місцях, особливо насичених іншими підземними комунікаціями, доводиться вдаватися до спеціальних споруд: колекторів, тунелів, каналів і блоків. При цьому поліпшуються умови експлуатації, знижується площа поверхні землі, необхідна для прокладання кабелів. Разом з тим вартість цих споруд занадто висока.

6.2.3 Внутрішні мережі

Залежно від типу і призначення приміщень внутрішні мережі виконують ізольованими проводами і шнурами, кабелями, струмопроводами (шинопроводами).

Ізольовані проводи мають зовнішні ізолювальні, а іноді й захисні покриття. Струмівідні жили проводів виконують з круглого мідного або алюмінієвого дроту. Виготовляють одно-, дво-, три-, чотирижильні і багатожильні проводи.

Ізолювальну оболонку виконують з гуми або поліхлорвінілового пластикату. Захисні покриття проводів з гумовою ізоляцією виконують у вигляді обплетення з волокнистих матеріалів, просочених протигнильною сумішшю. Проводи з поліхлорвініловою ізоляцією звичайно виготовляють без захисного покриття. Застосовують також металеві захисні оболонки для захисту від механічних пошкоджень.

Два скручені разом гнучкі ізольовані проводи називають шнуром. За напругою проводи виготовляють на 220, 380, 660, 2000 і 3000 В змінного струму, а шнури – на 220 В.

Випускається великий асортимент проводів і шнурів, призначених для різних умов прокладання і роботи. Проводи з мідною жилою і гумовою ізоляцією мають марки ПР, а з алюмінієвою жилою – АПР. Проводи марок ПР і АПР застосовують для нерухомих прокладок на ізоляторах всередині приміщень.

Для приєднання рухомих частин електричних машин і апаратів використовують ізольовані проводи підвищеної гнучкості марки ПРГ. Літера Г на марці проводу означає, що його жила має підвищену гнучкість. Для прокладання в сталевих, скляних та інших трубках



Рис. 6.2.21 застосовують ізольовані проводи марок ПРТО і АПРТО.

Проводи з поліхлорвініловою ізоляцією і з мідною або алюмінієвою жилою мають марки ПВ і АПВ (рис. 6.2.21).

Шнур з гумовою ізоляцією має марку ШР.

Для роботи в умовах підвищених температур застосовуються теплостійкі з фторопластовою ізоляцією проводи марок ПТЛ-200, СФУ, РКТФ.

Провід ПТЛ-200 – провід теплостійкий ізольований фторопластом у лакованій захисній оболонці зі склотканини. Струмівідна жила скручена з

мідного дроту і може мати переріз від 2,5 до 25 мм². Призначений для робіт при напрузі 250 В постійного і змінного струму частотою 50 Гц.

СФУ – провід зі склофторопластовою ізоляцією. Струмівідна жила проводу скручена з мідних посріблених і сталевих лудженого дроту. Призначений для роботи при низьких напругах у мережах постійного і змінного струму.

РКТФ – коаксіальний радіокабель теплостійкий з фторопластовою ізоляцією. Внутрішній провідник виконаний з мідного посрібленого дроту. Зовнішній провідник являє собою мідне посріблене обплетення. Застосовується у високочастотних електричних колах.

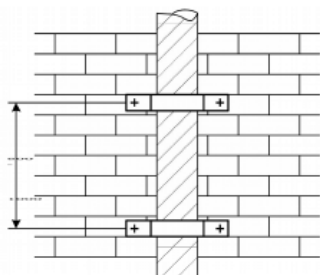


Рис. 6.2.22

За способом виконання проводки всередині приміщень діляться на відкриті і приховані. До відкритих належать проводки, виконані по поверхнях стін, стель, по фермах тощо. До їх числа належать проводки ізольованими проводами на ізоляторах, кабелями на скобах (рис. 6.2.22), шинопроводами.

До прихованих належать проводки всередині конструктивних елементів будівель: стін, підлог, перекрить. Розрізняють замінні і незамінні приховані проводки. При замінних проводках у процесі експлуатації проводи або кабелі можуть бути заміннені без руйнування будівельних конструкцій. До їх числа належать проводки в різних трубах, каналах і порожнечках будівельних конструкцій, з яких за потребою проводи або кабелі можуть бути витягнуті або затягнуті знову.

Проводи для електричних установок при стаціонарній прокладці в освітлювальних і живильних мережах, а також для монтажу електрообладнання, машин механізмів и верстатів на номінальну напругу до 450 В (для мереж до 450/750 В) частотою до 400 Гц або постійну напругу до 1000 В з поліхлорвініловою ізоляцією і мідною або алюмінієвою жилою мають марки ППВ і АППВ (рис. 6.2.23). Прокладається в сталевих трубах, каналах будівельних конструкцій, на лотках тощо, для монтажу електричних мереж. Для негнучкого монтажу.

Незамінними називають проводки, виконані проводами, наглухо вмонтованими в тіло будівельної конструкції. У разі виходу з ладу таку проводку практично доводиться замінювати відкритою.

Способи виконання проводок визначають в залежності від призначення приміщення, особливості будівельних конструкцій і технології, зручності експлуатації, економії, умов довкілля.

Приховане прокладання проводів у найбільшому ступені відповідає архітектурним і



Рис. 6.2.23

гігієнічним вимогам. Воно знаходить переважне застосування в громадських, адміністративних і житлових будівлях.

При значній кількості ліній, які проходять по одній трасі, застосовують прокладання проводів або кабелів у лотках.

Велике поширення знаходять струмопроводи. Струмопроводом називають улаштування, яке складається з провідників з усіма ізоляторами і конструкціями, які належать до нього, призначене для передачі і розподілу електроенергії. Струмопроводи виконують голими однодротовими і багатодротовими проводами і сталевими або алюмінієвими шинами різного профілю поперечного перерізу: прямокутного, коритного та ін.

Струмопроводи, виконані жорсткими шинами, називають шинопроводами. З метою зменшення розмірів струмопроводу і збільшення надійності його роботи інколи струмопроводи низької напруги виконують ізольованими шинами.

Струмопроводами низької напруги виконують магістральні лінії і розподільні мережі всередині цехів промислових підприємств.

Струмопроводи прокладають на кронштейнах, підтримувальних стояках і шляхом підвішування їх на стояках і тросах.

Струмопроводи високої напруги 6-20 кВ застосовують для передачі значної потужності на відстань 1,5-2 км. На підприємствах їх застосовують як магістральні лінії від джерел живлення до цехових підстанцій і окремих електроприймачів.

Струмопроводи високої напруги прокладають у закритих галереях або тунелях, а також у вигляді шинних мостів і підвісних гнучких струмопроводів. При великих струмах струмопроводи виконують з декількох проводів на фазу.

6.2.4 Нові конструкції проводів та кабелів

Самоутримні ізольовані проводи

Самоутримні ізольовані проводи (СП) призначені для повітряних ліній електропередачі і відгалужень до введів у житлові будинки, господарські будівлі в районах з помірним та холодним кліматом.



Рис. 6.2.22

Самоутримні ізольовані проводи випускаються таких типів:

- СП-1, 1А – проводи самоутримні з алюмінієвими фазними струмовідними жилами, з ізоляцією зі світлостабілізованої термопластичної полімерної композиції, з нульовою утримною жилою. Утримна нульова жила виконана з алюмінію зі сталевим осердям або з алюмінієвого сплаву високої міцності (літера «А» відповідає ізольованій утримній жилі);

- СП-2, 2А – проводи самоутримні з алюмінієвими фазними струмовідними жилами, з ізоляцією зі світлостабілізованої зшитої полімерної композиції. Решта така сама, як і у попередніх проводів;
- СП-3 – одножильний провід, жила скручується з дроту з алюмінієвого сплаву. Ізоляція жили – світлостабілізований зшитий поліетилен;
- СП-4 – провід самоутримний з алюмінієвими струмовідними жилами, з ізоляцією зі світлостабілізованої термопластичної полімерної композиції;
- СП-5 – провід самоутримний з алюмінієвими струмовідними жилами, з ізоляцією зі світлостабілізованого зшитого поліетилену; (5НГ – такий самий, як і СП-5, але не поширює горіння).

Струмовідні жили цих проводів скручуються між собою, а при наявності утримної жили – скручуються навколо неї. За ознаками кріплення можливо виділити три основні типи: з неізольованою утримною нульовою жилою (СП-1, -2), з ізольованою утримною нульовою жилою (СП-1А, -2А) та без утримної жили (СП-4, -5, -5НГ). При цьому механічне навантаження проводів СП-4, -5, -5НГ сприймається усіма струмовідними жилами.

Конструкція самоутримних ізольованих проводів наведена на рис. 6.2.22 та 6.2.23.

Маркування фазних жил проводів СП-1, 2, 4, 5 виконано кольоровими поздовжніми лініями на ізоляції.

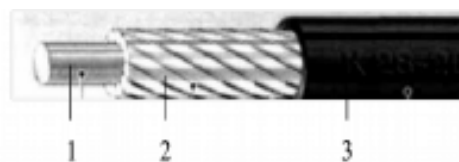


Рис. 6.2.23

Застосування. Проводи типу СП-1 застосовують для магістралей повітряних ліній та лінійних відгалужень від ПЛ на номінальну напругу промислової частоти до 1кВ включно.

Функціональне призначення проводів СП-2 аналогічне проводам СП-1, але проводи СП-2 застосовуються для ПЛ в забруднених районах (узбережжя морів, солоні водоймища, промислові райони і т. ін.).

Проводи типу СП-3 призначені для ПЛ на номінальну напругу 20 та 35 кВ без обмежень на забруднення.

Проводи типу СП-4 використовують для відгалужень від ПЛ до вводу і прокладання по стінах будинків та інженерних споруд на напругу до 1 кВ включно без обмежень на забруднення.

Проводи типу СП рекомендуються до використання в усіх кліматичних районах при температурі навколишнього середовища від -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

У порівнянні з традиційними ПЛ лінії з СП мають низку переваг:

висока надійність і безперебійність забезпечення споживачів електричною енергією;

можливість спільного підвішування на опорах проводів з різним рівнем напруги та з лініями зв'язку;

можливість спорудження ЛЕП без просік, монтажу по фасадах будинків;

□ виключення коротких замикань між фазними проводами або на землю; □

скорочення експлуатаційних витрат за рахунок виключення таких робіт, як розчищення траси ПЛ та заміна пошкоджених ізоляторів; □

простота монтажу і ремонту, особливо при роботах під напругою;

зниження енерговитрат у лінії внаслідок малого реактивного опору СІП;
скорочення обсягів аварійно-відновлювальних робіт;
виключення небезпеки пожежі у випадку падіння проводів на землю;
висока безпека обслуговування та безпека робіт поблизу ЛЕП;
зменшення ймовірності розкрадання електроенергії.

На практиці експлуатаційні витрати у традиційних ПЛ в 3-4 рази перевищують відповідні витрати для ПЛ із СІП.

Кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену

У наш час багато країн практично повністю перейшли на використання силових кабелів середньої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) й мають позитивний досвід експлуатації. В Україні енергосистеми

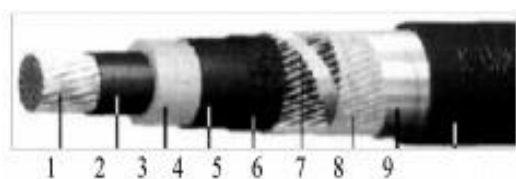


Рис. 6.2.24

також орієнтовані на використання кабелів з ізоляцією зі ЗПЕ при прокладанні нових кабельних ліній і заміні або капітальному ремонті старих.

Дійсно, кабелі з ізоляцією зі ЗПЕ мають ряд переваг перед кабелями з просоченою паперовою ізоляцією:

низькі діелектричні втрати;

висока стійкість до пошкоджень;

більша пропускна здатність за рахунок збільшення припустимої температури нагрівання жил: тривалої температури (90⁰С замість 70⁰С), а також температури при перевантаженні (130⁰С замість 90⁰С);

можливість прокладання на трасах з необмеженою різницею рівнів, а також низька допустима температура при прокладанні без попереднього підігріву (-20⁰С замість 0⁰С);

низьке вологовбирання, менша вага, діаметр і радіус вигину, що полегшує прокладання на складних трасах.

Конструкція таких кабелів наведена на рис. 6.2.24. На цьому рисунку цифри означають:

1— кругла багатодротова ущільнена струмовідна жила з алюмінію або міді перерізом від 50 до 800 мм²;

2— екран по жилі з екструдованого напівпровідного зшитого поліетилену;

3— ізоляція зі ЗПЕ;

4— екран по ізоляції з екструдованого зшитого поліетилену;

5— розділовий шар зі стрічки електропровідного крепірованого паперу або з електропровідної водоблокувальної стрічки;

6— екран з мідних дротів, скріплених мідною стрічкою;

7— розділовий шар з двох стрічок крепірованого паперу або полімерної чи водоблокувальної стрічки;

8— шар з алюмополімерної стрічки;

9— оболонка з поліетилену або пластикату.

Силові кабелі середньої напруги (до 35 кВ) з ізоляцією зі ЗПЕ мають дуже хороші електричні, механічні й теплофізичні властивості. Їх матеріал ідеальний за своїми хімічними властивостями при екстремальних зниженнях температури. Для них характерна незмінність параметрів у широкому діапазоні робочих температур, водостійкість, малі діелектричні втрати.

Силові кабелі середньої напруги застосовуються для встановлення на підстанціях, у закритих приміщеннях і в кабельних каналах, на відкритому повітрі й у землі.

6.3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

6.3.1 Вимоги до електричних мереж і загальні знання про їх розрахунок

Електричні мережі повинні відповідати таким основним вимогам:
якомога менші витрати на спорудження та експлуатацію мережі при забезпеченні необхідного ступеня надійності електропостачання згідно з категорією споживачів;

забезпечення високої якості електроенергії;

зручність і безпека експлуатації;

можливість подальшого розвитку мережі при збільшенні навантажень споживачів без корінної її перебудови.

За необхідним ступенем надійності електропостачання поділяють споживачів електроенергії на три категорії.

До категорії I належать електроприймачі, порушення електропостачання яких може призвести до небезпеки для життя людей, значних збитків народному господарству, пошкодження обладнання, масового браку продукції, розладжування складного технологічного процесу, порушення особливо важливих елементів міського господарства.

До категорії II належать електроприймачі, перерва в електропостачанні яких пов'язана з масовою недодачою продукції, простоем робітників, механізмів і промислового транспорту, порушенням нормальної діяльності значної кількості міського населення.

До категорії III належить решта електроприймачів, які не підходять під визначення категорій I і II, наприклад, електроприймачі допоміжних цехів, невеликих населених пунктів тощо.

Необхідний ступінь надійності електропостачання забезпечується вибором схеми мережі, окремих елементів та її виконання в цілому.

Висока якість електроенергії для електромережі полягає у підтриманні в заданих межах частоти і напруги у споживачів.

Зручність і безпека експлуатації забезпечується виконанням вимог проектування мереж, зазначених у нормативних і керівних документах.

Вимога до електромереж у забезпеченні можливості їх подальшого розвитку реалізується таким чином, що проектування мереж звичайно

ведеться для перспективного навантаження, яке очікується не раніш як через 10 років.

Для створення електромереж, які відповідають вищевикладеним вимогам, при проектуванні їх виконують необхідні розрахунки, до числа яких належать:

1. Техніко-економічний розрахунок. Повинен забезпечити такий підбір номінальної напруги мережі, перерізів проводів і кабелів, способів регулювання напруги і т.п., за яких проектувана мережа була б найекономічнішою, тобто вимагала мінімальних первинних грошових витрат і мінімального витрачання кольорового металу при найменших щорічних експлуатаційних витратах.

2. Розрахунок на нагрівання проводів і кабелів. Має на меті визначити величину струму, допустиму для даного перерізу проводу або кабелю за заданими умовами охолодження або, навпаки, вибрати переріз проводу або кабелю, який забезпечує дотримання заданих величин струму й умов охолодження. Цей розрахунок потрібний, щоб запобігти небезпечному перегріванню струмовідних жил проводів і кабелів та їх ізоляції.

3. Розрахунок по втраті напруги в лініях мережі. Має завдання забезпечити споживачів електроенергією потрібної якості. У процесі розрахунку вибирають переріз проводу або жил кабелю так, щоб втрати напруги у лініях електромережі не перевищували допустимих значень. При цьому виявляють також необхідність застосування спеціальних засобів регулювання напруги в мережі.

4. Розрахунок на механічну міцність (механічний розрахунок). Дозволяє вибрати раціональну конструкцію й оптимальний розмір проводів, тросів, опор, ізоляторів та інших елементів повітряних ліній.

5. Додаткові розрахунки. Полягають у виявленні теплової дії струмів короткого замикання на проводи і кабелі, у перевірці стійкості паралельної роботи електростанцій, в установленні надійності роботи і пропускну здатності мереж у післяаварійних режимах тощо.

Для різних типів мереж не всі зазначені розрахунки є визначальними при виборі перерізів проводів і кабелів. Головним розрахунком для всіх мереж при певній нарузі є вибір економічно доцільного перерізу. Решта розрахунків перевіряють. З них переважне значення для електромереж різних типів мають такі розрахунки:

- для повітряних місцевих мереж – розрахунок за втратою напруги;
- для кабельних мереж – розрахунок на нагрів.

Для ліній повітряних електромереж потрібний розрахунок на механічну міцність проводів і опор.

Для забезпечення необхідної механічної міцності ПУЕ встановлені мінімальні перерізи і діаметри проводів і тросів, які можна застосовувати на повітряних лініях: для мідних проводів – 6 мм², алюмінієвих – 16 мм², для сталевих проводів мінімальний діаметр 3 мм.

6.3.2 Вибір проводів і кабелів за нагрівом

Уже зазначалось, що при визначенні тривало допустимих струмів проводів і кабелів користуються довідковими таблицями, складеними для різних марок проводів та умов їх прокладання. Ці таблиці поміщені в ПУЕ і є загальнодержавними нормативами.

Для правильного використання цих даних нижче наведені додаткові пояснення.

Розрахункову температуру навколишнього біля провідника середовища приймають, виходячи з таких умов:

- для проводів повітряних ліній – середньомісячну температуру повітря в 13 год. за найбільш жаркий місяць;
- для голих та ізольованих провідників усередині будівель – найбільшу середньомісячну температуру повітря;
- для кабелів, прокладених у повітрі – середньодобову температуру повітря за найбільш гарячу добу;
- для кабелів, прокладених у землі, – середньомісячну температуру ґрунту на глибині прокладання 0,7-1 м у розглядуваному районі за найбільш жаркий місяць.

У чинних ПУЕ для голих та ізольованих провідників у середині і зовні приміщень і для кабелів у повітрі прийнята розрахункова температура повітря $+25^{\circ}\text{C}$, а для кабелів у землі – розрахункова температура ґрунту $+15^{\circ}\text{C}$.

Тривало допустима температура нагріву голих проводів і шин прийнята рівною 70°C , тому що при більшій температурі спостерігається підсилене окислення контактних з'єднань, яке приводить до значного збільшення їх перехідних опорів.

У закритих приміщеннях обмеження нагріву голих провідників температурою 70°C обумовлене також вимогами пожежної безпеки – при великій температурі нагріву провідників можливе запалювання легкозаймистих частинок з різних матеріалів, які потрапляють на них.

Для проводів з гумовою ізоляцією тривало допустима температура нагріву дорівнює 65°C за умови збереження ізоляції.

Для кабелів з паперовою ізоляцією у свинцевій, алюмінієвій або іншій оболонці тривало допустима температура нагріву жил залежить від робочої напруги: при напрузі 3 кВ і нижче – 80°C , при 6кВ – 65°C , при 10 кВ – 60°C , при 20 і 35 кВ – 50°C .

Величина тривало допустимої температури нагріву жил кабелів обумовлена стійкістю кабельної ізоляції, яка при підвищенні температури погіршує свої ізолюючі властивості, і прагненням зменшити розміри повітряних включень усередині ізоляції кабелів. Через останню обставину при збільшенні робочої напруги кабелю зменшують величину допустимої температури жил кабелів.

Допустимі тривалі струмові навантаження на кабелі прийняті за умови прокладання одного кабелю в траншеї при питомому тепловому опорі землі, який дорівнює 120 Ом град/Вт. При прокладанні кабелів у сухих

піщаних і кам'янистих ґрунтах їх допустимі навантаження значно менші і визначаються розрахунком або ж установлюються дослідним шляхом.

Прокладання поруч декількох кабелів у траншеї погіршує умови тепловіддачі в ґрунт через тепловий вплив кабелів один на одного. У цих випадках навантаження, зазначені в згаданих таблицях, мають бути зменшені введенням поправкового коефіцієнта на кількість кабелів.

Допустимі тривалі струмові навантаження на одиничні кабелі, які прокладаються в землі у трубах довжиною більше 10 м, повинні прийматись за таблицями навантажень для кабелів, які прокладаються в повітрі. Однак оскільки температура повітря в трубах дорівнює температурі землі, треба зробити перерахунок навантажень.

На практиці часто зустрічаються мішані прокладання кабельних ліній по трасі. Так, наприклад, від комірки розподільного устаткування кабельну лінію спочатку прокладають по підвалу або по кабельному каналу станції, потім – по земляній траншеї окремо або разом з іншими кабельними лініями, а на перетинах вулиць – у трубах. У цьому разі допустиме тривале навантаження кабельної лінії треба визначати, виходячи з допустимих навантажень для ділянки з найгіршими умовами охолодження, якщо ця ділянка має довжину, більшу 10 м.

З метою зниження капітальних затрат іноді беруть кабелі з різними перерізами для лінії, які мають ділянки різної теплопровідності. Кожний з цих перерізів має відповідати вимогам граничного навантаження за нагрівом, якщо це допустимо з економічної густини струму.

Проводи і кабелі будь-якого призначення повинні відповідати вимогам у відношенні гранично допустимого нагріву не тільки в нормальних, але й післяаварійних режимах, а також у період ремонтних робіт і т.д.

Для кабелів напругою до 10 кВ з паперовою просоченою ізоляцією з навантаженням менше номінального допускається короткочасне перевантаження, зазначене в ПУЕ.

На час ліквідації післяаварійного режиму для кабелів з поліетиленовою ізоляцією допускається перевантаження до 10%, а для кабелів з полівінілхлоридною ізоляцією – до 15% номінального на час максимумів навантаження тривалістю не більше 6 год. на добу протягом 5 діб, якщо навантаження в інші періоди часу цих діб не перевищує номінальне.

На час ліквідації післяаварійного режиму для кабелів напругою до 10 кВ з паперовою ізоляцією допускаються перевантаження протягом 5 діб у межах, зазначених в ПУЕ.

6.3.3 Вибір перерізів проводів і параметрів захисних пристроїв у мережах напругою до 1000 В

При експлуатації в лініях електричних мереж можлива поява струмів, значно перевищуючих допустимі, а саме: струмів перевантаження і короткого замикання. Ці струми занадто нагрівають провідники мережі, що призводить до передчасного зносу ізоляції, пошкоджень окремих ділянок

мережі, пожеж тощо. Для запобігання цьому застосовують захисні пристрої – плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі, теплові реле, які діють на магнітні пускачі або контактори.

Вибраний переріз проводу або кабелю має бути узгоджений з номінальним струмом застосованого захисного пристрою.

Плавкі запобіжники

Плавкі запобіжники слід вибирати з дотриманням нижченаведених умов.

Для номінальних струмів плавких вставок запобіжників установлена стандартна шкала.

Номінальний струм плавкої вставки запобіжника повинен дорівнювати максимальному робочому струму або бути трохи більше нього.

Зазначена умова дійсна для приймачів, навантаження яких не має коливань у бік перевищення нормального значення (освітлювальне навантаження, електронагрівальні прилади і та ін.).

Інакше маємо справу з вибором плавких вставок запобіжників у колах електродвигунів, у яких у момент пуску виникають струми, значно перевищуючі за величиною струми нормальної роботи. Вибирати в цьому разі плавкі вставки, приймаючи за робочі пускові струми, означало б дуже завищувати номінальний струм вставок і, отже, переріз проводів. Тому величину максимального струму, що дорівнює в даному випадку пусковому струму, умовно зменшують у α разів. Таке умовне зменшення величини пускового струму цілком допустиме, якщо взяти до уваги його короткочасність і характеристики запобіжників.

У розгалуженій мережі доводиться ставити декілька послідовно ввімкнених запобіжників, наприклад, на головному щиті – для захисту магістрального кабелю, на групових щитках – для захисту групових відгалужень і, нарешті, біля індивідуальних приймачів. У цьому випадку вставки запобіжників мають бути підібрані так, щоб першою перегоріла та, яка знаходиться ближче до місця пошкодження, тобто повинна бути дотримана вибірковість роботи запобіжників. Це досягається тим, що вставка кожного наступного запобіжника (по ходу від приймача до джерела живлення) повинна бути на два або в крайньому разі на один ступінь вище за номінальним струмом. Вибірковості можна досягти також відповідним підбором характеристик запобіжника.

Для забезпечення більш надійного захисту проводів від перевантажень вибирають плавкі вставки запобіжників з номінальним струмом на 20% менше допустимого навантаження проводу, а проводи навантажують не більш як на 80% тривало допустимого для них навантаження. Це веде до поганого використання матеріалу проводів, і до такого положення вдаються лише в тих випадках, коли мережі не знаходяться постійно під спостереженням персоналу і можуть бути перевантажені (наприклад у житлових будинках).

Для мереж промислових підприємств, які обслуговує кваліфікований персонал, з метою економії матеріалу проводів вибирають запобіжники так, щоб вони захистили мережі тільки від пошкоджень при струмах короткого замикання.

Отже, при захисті мереж запобіжниками переріз проводів і кабелів повинен визначатись не тільки за умовою нагріву, але й узгоджуватись із

$$I_{дон} \geq \frac{I_{вст}}{k}.$$

номінальним струмом плавкої вставки запобіжника, який захищає мережу. де k – коефіцієнт відповідності, який залежить від умов прокладання і нагляду за мережею: для промислових і силових мереж у житлових будинках $k = 3$; для мереж, які живлять освітлювальні і побутові навантаження в житлових будинках, $k = 0,8$.

Автоматичні вимикачі і теплові реле

Суттєвим недоліком плавких запобіжників є те, що вони не завжди забезпечують вибірковий захист мережі. Тому в сучасних електроустановках для захисту електродвигунів і ліній, які їх живлять, все ширше використовують автоматичні вимикачі й теплові реле, котрі діють на вимкнення магнітних пускачів або контакторів.

Автомат вимикається розчіплювачем. Застосовують розчіплювачі теплові, електромагнітні і комбіновані. Комбінований розчіплювач складається з теплового й електромагнітного елементів, які діють незалежно на вимкання автомата.

Тепловий розчіплювач складається з біметалевої пластинки, виконаної з двох металів з різними коефіцієнтами лінійного розширення. При сильному нагріванні струмом перевантаження ця пластинка розчіплювача згинається і звільнює рухому систему автомата, який вимикається.

На цьому ж принципі виконуються й теплові реле магнітного пускача.

Автомати з тепловими розчіплювачами та магнітні пускачі з тепловими реле добре захищають лінії електромережі тільки від перевантажень, але не захищають їх від струмів короткого замикання, тому що мають велику теплову інерцію. Тому для захисту від струмів короткого замикання послідовно з такими автоматами вмикають плавкі запобіжники.

Електромагнітний розчіплювач вимикає при струмі, рівному або перевищуючому струм спрацьовування автомата, при чому діє він миттєво незалежно від ступеня цього перевищення. Очевидно, що автомат з електромагнітним розчіплювачем може захищати лінію електромережі тільки від струмів короткого замикання, але не від перевантаження.

Автомати з комбінованими розчіплювачами захищають мережу від перевантажень і струмів короткого замикання.

Основними перевагами автоматів і магнітних пускачів порівняно з плавкими запобіжниками є більш удосконалений захист від перевантажень і

струмів короткого замикання, а також одночасне відімкнення всіх трьох фаз мережі і виключення роботи електродвигунів на двох фазах, які ведуть до перегрівання двигунів. Останнє можливе при перегорянні запобіжника в одній фазі лінії.

Вибір розчіплювачів і теплових реле аналогічний вибору запобіжників. Струм спрацьовування розчіплювача і теплового реле має бути не менше максимального робочого струму лінії:

Це стосується як теплового, так і електромагнітного розчіплювача. Але

$$I_{cnp} \geq I_{max}.$$

останній додатково має бути перевірений за максимальним струмом перевантаження лінії:

$$I_{cnp.el} \geq 1,25I_{max},$$

де 1,25 – коефіцієнт запасу, який ураховує можливі неточності в настройці розчіплювача.

Переріз проводів і кабелів при захисті ліній електромережі автоматами і магнітними пускачами вибирають як і при захисті мережі запобіжниками. Потім вибраний переріз проводів для силових мереж перевіряють за формулами:

при автоматах з тепловими розчіплювачами:

$$I_{дон} \geq \frac{I_{cnp.мелл}}{1,5};$$

при автоматах з електромагнітними розчіплювачами:

Для мереж, які живлять освітлювальні й побутові навантаження і

$$I_{дон} \geq \frac{I_{cnp.el}}{4,5}.$$

захищені автоматами, так само, як і у випадку захисту запобіжниками, має виконуватись співвідношення:

$$I_{дон} \geq \frac{I_{cnp}}{0,8}.$$

6.4 ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

6.4.1 Класифікація електричних апаратів

Електричні апарати – електротехнічні пристрої, призначені для керування потоками енергії або інформації. Керування може здійснюватися потоками енергії різного виду: електричної, механічної, теплової тощо. Розглядаються електричні апарати, призначені для керування потоками електричної енергії з метою зміни режимів роботи, регулювання параметрів, контролю й захисту електроустановок. Як правило, електричні апарати функціонують за допомогою комутації (включення й відключення) електричних кіл з різною частотою, починаючи від нечастих та

нерегулярних значень до періодичних височастотних, наприклад, в імпульсних регуляторах напруги.

Розрізняють електричні апарати низької напруги – напругою до 1000 В і електричні апарати високої напруги – напругою вище 1000 В. Електричні апарати низької напруги також класифікують за величиною струму, що комутується: слабо-струмові – до 10 А та сильно-струмові – понад 10 А.

Апарати низької напруги умовно поділяють на наступні види:

– апарати керування й захисту – автоматичні вимикачі, контактори, реле, пускачі електродвигунів, перемикачі, рубильники, плавкі запобіжники, кнопки керування й інші апарати, що управляють режимами роботи електроустановок і здійснюють їх захист;

– апарати автоматичного регулювання – стабілізатори і регулятори напруги, струму, потужності та інших параметрів електричної енергії;

– апарати автоматики – реле, датчики, підсилювачі, перетворювачі та інші апарати, що здійснюють функції контролю, посилення й перетворення електричних сигналів.

Електричні апарати як низької, так і високої напруги звичайно є конструктивно закінченими технічними пристроями, що реалізують певні функції й розраховані на різні умови експлуатації.

За принципом роботи електричні апарати поділяють на контактні й безконтактні. Контактні електричні апарати мають рухливі контактні частини, і в них вплив на коло керування здійснюється шляхом замикання або розмикання цих контактів. Безконтактні електричні апарати не мають рухливих контактів. Такі апарати здійснюють керування шляхом зміни своїх електричних параметрів (індуктивності, ємності, опору тощо).

Контактні апарати можуть бути автоматичними, напівавтоматичними та неавтоматичними. Автоматичними є апарати, що працюють залежно від заданого режиму роботи електричного кола та незалежно від дій оператора. Неавтоматичними є апарати, робота яких залежить тільки від дій оператора. Ними можна керувати дистанційно або безпосередньо (вони є ручними). Проміжними є напівавтоматичні апарати, частина операцій у яких виконується при втручанні оператора, а частина автоматично. Коли апарат здійснює яку-небудь дію, то говорять, що "апарат спрацьовує".

Більшість електричних апаратів призначена для здійснення якої-небудь однієї функції. Наприклад, рубильники служать тільки для включення і відключення установок. Існують апарати, що виконують кілька функцій. Такі електричні апарати називаються комплектними.

В електричних апаратах використовуються різні фізичні явища: вплив магнітного поля на феромагнітні тіла, взаємодія електричного струму з магнітним полем, виникнення ЕРС і вихрових струмів у масивних провідних тілах у змінному магнітному полі тощо.

Розглянемо докладно деякі типи електричних апаратів.

6.4.2 Рубильники

Рубильник є найпростішим ручним комутаційним апаратом, призначеним для вмикання і вимикання електричних кіл. Бувають однополюсними, двополюсними, триполюсними і багатопольсними.

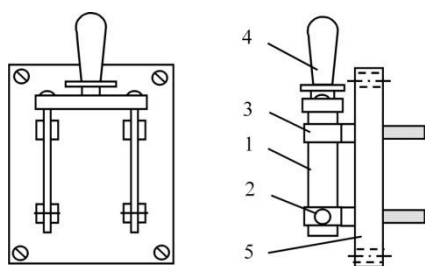


Рис. 6.4.1

Конструкція найпростішого двополюсного рубильника зображена на рис. 6.4.1.

Для створення надійного електричного контакту необхідний певний тиск між контактними поверхнями. У рубильниках, розрахованих на невеликі струми, цей тиск здійснюється за рахунок пружних властивостей міді губок 3 та ножів 1. У рубильниках на великі струми необхідний тиск створюється спеціальними неструмопровідними сталевими пружинами.

Відомо, що при замиканні і розмиканні контактів утворюються електричні дуги. У низьковольтних рубильниках змінного струму на середні і малі струми гасіння дуги здійснюється швидкою деіонізацією газів. Ефективним заходом є застосування дугогасних решіток, що складаються з набору мідних або сталевих пластин, ізольованих одна від одної і від інших частин апарата (рис. 6.4.2). Дуга направляється в дугогасні решітки, де розбивається на ряд коротких дуг між пластинами і швидко гасне. При цьому дугогасні пластини інтенсивно поглинають тепло.



Рис. 6.4.2

Відомо, що при замиканні і розмиканні контактів утворюються електричні дуги. У низьковольтних рубильниках змінного струму на середні і малі струми гасіння дуги здійснюється швидкою деіонізацією газів. Ефективним заходом є застосування дугогасних решіток, що складаються з набору мідних або сталевих пластин, ізольованих одна від одної і від інших частин апарата (рис. 6.4.2). Дуга направляється в дугогасні решітки, де розбивається на ряд коротких дуг між пластинами і швидко гасне. При цьому дугогасні пластини інтенсивно поглинають тепло.

6.4.3 Кнопки керування

Кнопки керування застосовуються для дистанційного керування електромагнітними апаратами (контакторами, магнітними пускачами), а також для включення кіл сигналізації. Конструкцію кнопки керування показано на рис. 6.4.3.

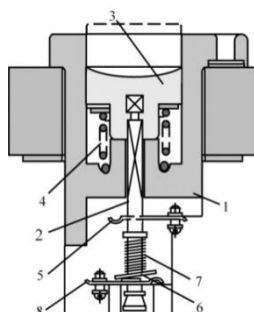


Рис. 6.4.3

Кнопка керування має один або два контакти місткового типу, які, залежно від призначення, можуть бути розмикальними або замикальними. Контакти виготовляються мідними, посрібленими, срібними, метало-керамічними. Кнопки можуть виконуватися із самоповертанням у вихідне положення. Кнопки можуть комплектуватися у кнопкові пости.

6.4.4 Універсальні перемикачі

Універсальні перемикачі служать для ручного перемикання кіл керування і силових кіл малої потужності.

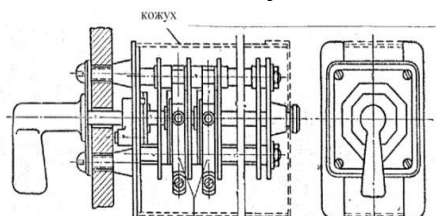


Рис. 6.4.4

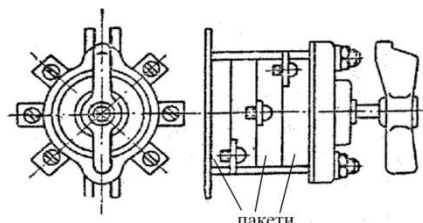


Рис. 6.4.5

Установлюються на щитах і пультах керування. Дозволяють одержати будь-яку послідовність переключень для різних умов роботи. Конструкцію універсального перемикача приведено на рис. 6.4.4.

Універсальний перемикач складається з набору контактних секцій, стягнутих шпильками. Через усі секції проходить центральний вал, що несе кулачкові шайби із пластмаси, що замикають і розмикають контакти при повороті рукоятки.

Пакетні перемикачі. Пакетні перемикачі (вимикачі) використовуються для пуску дрібних двигунів і перемикання кіл керування. Зовнішній вигляд пакетного перемикача приведено на рис. 6.4.5.

6.4.5 Реле

Існують реле керування, реле автоматики та реле захисту.

Реле керування й автоматики призначені для автоматичного керування електроприводами та іншими електротехнічними пристроями. Реле керування можуть також служити для захисту електроустановок.

Спрацьовування реле відбувається або при втягуванні якоря, або при відпусканні його. На рис. 6.4.6, а показано конструкцію реле з хитним якорем. Притягання якоря приводить до розмикання або замикання контактів. На рис. 6.4.6, б показано конструкцію реле

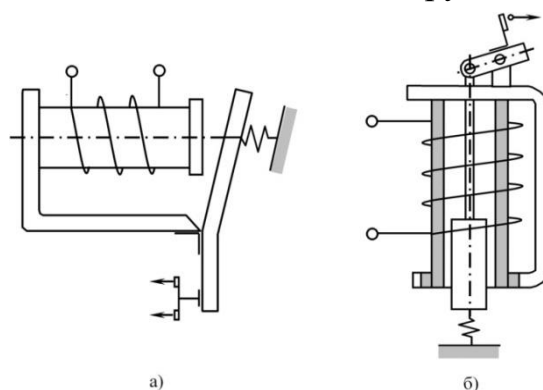


Рис. 6.4.6

реле соленоїдного типу. Якір утягується полем котушки усередину гільзи з немагнітного матеріалу, змушуючи спрацьовувати контакти реле.

Реле захисту призначені для контролю й керування режимами роботи елементів електричної системи: генераторів, трансформаторів, двигунів, ліній передачі. При порушенні нормального режиму роботи реле посилають імпульс, що приводить у дію апаратуру автоматичного керування, яка відновлює нормальні умови роботи або відключає ушкоджену ділянку. До реле захисту відносяться, зокрема, теплове реле та пристрій захисного автоматичного вимикання живлення автоматичних вимикачів.

Електромагнітні контактори. Електромагнітні контактори застосовуються для частих вмикань та вимикань потужних електричних кіл. Контактори не призначені для вимикання аварійних струмів короткого замикання або перевантаження.

Електромагнітний контактор має котушку, що втягує рухливий якір, систему головних контактів, дугогасний пристрій. Головні контакти розраховані на комутацію значних струмів.

6.4.6 Магнітні пускачі

Магнітні пускачі (МП) призначені для керування (пуску, зупинки, реверсування) електродвигунами малої і середньої потужності. Основним елементом магнітного пускача є контактор. Керування здійснюється за допомогою кнопочового поста, що вбудовується в пускач або розташовується окремо.

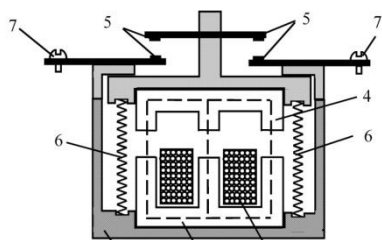


Рис. 6.4.7

На рис. 6.4.7 пояснюється конструкція неререверсивного магнітного пускача із прямохідною рухомою частиною.

Неререверсивний магнітний пускач із прямохідною рухомою частиною має магнітопровід (осердя) 2, який виконано розімкнутим. При пропусканні електричного струму по котушці 3 в магнітопроводі виникають магнітні силові лінії (показані пунктиром) та якор 4 притягується до магнітопроводу 2. Внаслідок цього контакти 5 замикаються.

На рис. 6.4.8 показано найпростішу схему вмикання трифазного асинхронного двигуна за допомогою неререверсивного магнітного пускача. При натисканні на кнопку "пуск" електричний струм подається на котушку магнітного пускача. Це приводить до його спрацьовування, і на затискачі С1, С2, С3 статора двигуна подається напруга. Блок-контакт АБ, що замкнувся, шунтує кнопку "пуск", яку можна відпустити. Для зупинки двигуна достатньо натиснути кнопку "стоп".

Магнітні пускачі серії П (ПА, ПМЕ, ПМИ тощо) відрізняються "величиною", яка позначається арабськими цифрами. Чим більше "величина" магнітного пускача, тим на більший струм розраховано його контакти.

Більшість магнітних пускачів мають вбудоване теплове реле, що захищає двигун від перевантаження.

Крім теплових реле, в магнітні пускачі визначених серій вмонтовуються пристрої температурного позисторного захисту, призначені для відключення двигуна, що захищається, від мережі при нагріванні його обмотки, що може статися з будь-яких причин.

Маркування магнітних пускачів є літерно-цифровим. Літери позначають серію магнітного пускача (наприклад, ПА, ПАЕ, ПМЕ). Перша цифра позначає "величину" пускача (наприклад, магнітні пускачі серії ПА випускаються чотирьох величин: 3-тя величина – пускач розрахований на номінальний струм 40 А (найбільша потужність двигуна 13 кВт за напруги 380 В), 4-та величина – 56 А (20 кВт), 5-та величина – 115 А (55 кВт), 6-та величина – 140 А (75 кВт). Друга цифра позначає ступінь захисту оболонки

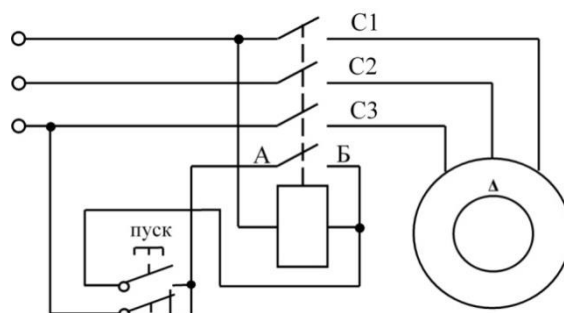


Рис. 6.4.8

(1 – відкритий (IP00), 2 – захищений (IP20), 3 – закритий (IP54)). Третя цифра позначає можливість реверсування двигуна та наявність теплового реле (1 – без реверсування та теплового реле; 2 – без реверсування, з тепловим реле; 3 – з реверсуванням, без теплового реле; 4 – з реверсуванням та тепловим реле).

Приклад маркування магнітного пускача: ПА-322. Розшифровується наступним чином: магнітний пускач серії ПА, 3-ї величини (розрахований на струм до 40 А), у захищеному корпусі (ступінь захисту оболонки IP20), без реверсування, з тепловим реле.

6.4.7 Автоматичні вимикачі

В електричних установках можливі режими роботи, коли електричне устаткування піддається небезпеці руйнування. До таких режимів відносяться:

- режим короткого замикання (КЗ) – коли струм, що протікає по установці перевищує номінальний в сотні і тисячі раз;

- режим перевантаження при зниженні напруги в мережі.

При КЗ термічні, електродинамічні впливи струмів можуть вивести із ладу електричні схеми і устаткування, в тому числі і електричні апарати.

Пониження напруги в мережах із навантаженням у вигляді двигунів означає підвищення струму (перевантаження), оскільки межі навантаження на валу двигунів залишається незмінним. Це призводить до збільшення струмів у місці КЗ на 20-30%. Перевантаження зв'язані також із пусковими струмами, що досягають перевищення номінальних струмів в 5-10 раз.

Допустимий час проходження струмів перевантаження регламентується часом досягнення допустимої температури нагрівання струмоведучих частин. При струмі перевантаження $1,5-2 I_{ном}$ він складає десятки хвилин, а при великих струмах перевантаження порядку секунди.



Рис. 6.4.9

Якщо контактор розраховано лише на струми, які досягають 1000 А, електричний апарат вимикає струми в 10 і 100 кА.

Це – перша відмінність автоматів від контакторів. Друга відмінність полягає в тому, що автомати рідко вимикають електричне коло, в той час як контактор призначений для частих оперативних комутацій. Автомати повинні негайно реагувати на аварійний режим у колі.

Автоматичний вимикач чи автомат (АВ) (рис. 6.4.9) – це електричні апарати, призначені для захисту електричних мереж при перевантаженнях (короткочасних коротких замиканнях, зміні напрямку потужності, зміні напруги живлення) шляхом автоматичного вимикання електричних кіл.

Автомати є апаратом захисту, що, зокрема, виконує функцію ручного вимикача для нечастих комутацій електричної мережі.

Основні види автоматів та їх основні параметри

Залежно від виду впливаючого параметра автомати поділяються на максимальні автомати за струмом, мінімальні автомати за струмом, мінімальні автомати за напругою, автомати зворотного струму, автомати, що спрацьовують за похідною струму, поляризовані (спрацьовують тільки при певному напрямку струму).

Всі найбільш розповсюджені автомати, що широко застосовуються в різних областях енергетики, поділяються на установлювальні та універсальні.

Установлювальні автомати відрізняються тільки тим від універсальних, що мають спеціальний корпус, тому вони застосовуються в житлових приміщеннях, морських суднах, підстанціях.

Універсальні автомати мають таку саму будову, але застосовуються лише там, де доступ сторонніх осіб, крім персоналу, заборонено.

Автомати поділяються також на *швидкодіючі* і *не швидкодіючі*.

Перші застосовують там, де КЗ є особливо небезпечним і час його тривання не більше 5 мкс. Вони обмежують величину струму КЗ, завдяки своїй високій швидкодії.

Установлювальні автомати, що можуть встановлюватись у житлових будинках, приміщеннях мають пластмасовий корпус.

Ще один різновид автоматів – *автомати гасіння магнітного поля*. Вони зводять до нуля дуже швидко магнітне поле, створене обмоткою генераторів, яке зумовлене коротким замиканням в головному колі. Якщо не зняти поле збудження такого генератора, і тим самим не припинити виробіток енергії генератором, то внаслідок короткого замикання великі струми генератора викличуть пожежу в середині генератора, а отже його руйнування. Ще одна група – *автомати для захисту напівпровідникових приладів*. Автомати повинні, якщо вони утворюють систему, яка захищає розгалужену електричну мережу, забезпечувати захист цієї мережі селективно, тобто автомат повинен відключати від справної пошкоджену ділянку. При цьому справна ділянка не відключається.

Основні вузли і параметри автоматів

Кожен автомат має обов'язково такі вузли і системи:

- 1) струмоведуча система;
- 2) дугогасильна система;
- 3) привід автомата (служить для вмикання автоматичного вимикача за певною командою. Це може бути команда оператора або команда від автоматичної системи керування);
- 4) механізм автомата;

5) механізм вільного розчеплення і елементи захисту розчеплювачів.

До основних параметрів автоматів відносяться:

- 1) повний час вимикання;
- 2) номінальний тривалий струм;
- 3) номінальна напруга;
- 4) граничний струм вимикання.

Залежно від заданих параметрів по-різному конструюються і виглядають основні вузли і системи автомата, відрізняються їх габарити, маса матеріали, із яких виготовляються окремі деталі.

Дугогасильні системи

В автоматах застосовують напівзакрите і закрите виконання дугогасильних пристроїв.

У напівзакритому виконанні апарат закритий ізоляційним кожухом із отворами для виходу газів. Об'єм ізоляційного кожуха досить великий, щоб виключити великі надлишкові тиски.

Зона викиду гарячих та іонізованих газів складає декілька сантиметрів від вихлопних щілин. Таке виконання застосовується в установлювальних та універсальних автоматах, що монтуються поруч з іншими автоматами, в розподільних пристроях, автоматах із ручним керуванням. Граничний струм, що відключається, не повинен перевищувати 50 кА.

В швидкодіючих автоматах і автоматах на великі граничні струми (≥ 100 кА) і великі напруги (> 1000 В) застосовують дугогасильні пристрої відкритого виконання із великою зоною викиду.

В установлювальних та універсальних автоматах масового застосування широко застосовується дугогасильна решітка із сталевих пластин.

Оскільки ці автомати застосовують для вимикання як постійного, так і змінного струму, то число пластин вибирається як для постійного струму – на кожну пару пластин повинно припадати не більше 25 В.

Такі дугогасильні пристрої при змінній напрузі $U \approx 660$ В забезпечують гасіння дуги до струму $I_{\text{гас}} \leq 50$ кА. На постійну напругу $U = 440$ В, $I_{\text{гас}} \leq 55$ кА.

При великих струмах застосовують лабіринто-щілинні камери із повздовжньою щілиною. В лабіринто-щілинній камері поступове входження дуги в зигзагоподібну щілину не створює великого аеродинамічного опору при великих струмах.

Для того, щоб дуга інтенсивно охолоджувалась, матеріал має мати високу теплопровідність і температуру плавлення. В якості матеріалу для камери застосовується кераміка – кордієрит.

Газоутворюючі матеріали (фібра, органічне скло) не застосовують через їх високий аеродинамічний опір входженню дуги в камеру.

У даний час з метою спрощення конструкції знову замість потужних і складних систем магнітного «дугтя» повертаються до використання деіонних сталевих решіток.

Стальні ізольовані керамікою пластини, що мають паз для дугогасильних контактів, створюють зусилля, що переміщає дугу. Гасіння дуги так само, як і в камері із поперечними ізоляційними перегородками, але без спеціальної системи «магнітного дуття».

У високочастотних апаратах $f = 5 - 10$ кГц у феромагнетиках наводяться вихрові струми, що відштовхують дугу від решітки. Така ж сила виникає і при застосуванні латунних решіток. Тому необхідні спеціальні електромагнітні системи.

Відновлювальна міцність у латунних пластин вище – чим у феромагнетиках, тому вони застосовуються у високочастотних апаратах.

Підвищити здатність вимикання вимикачів можна застосуванням паралельних контактних систем. У такому випадку здатність вимикання підвищується пропорційно числу паралельно ввімкнених контактів. Підвищення здатності вимикання також пов'язано із створенням умов, при яких основні контакти розмикаються без дуги. При їх розмиканні струм переходить у дугогасильні контакти.

Приводи та механізми установлювальних і універсальних апаратів

Привод служить для вмикання вимикача за командою оператора або системи автоматичного управління, або інші подібні системи. Він забезпечує необхідну для вмикання автомата силу натиску на контакти.

Залежно від номінального струму автомата застосовуються такі приводи:

- ручний ($I_{ном}$ до 200 А);
- електромагнітний ($I_{ном}$ до 1 кА);
- електродвигунний ($I_{ном}$ вище 1 кА);
- пневматичний ($I_{ном}$ вище 1 кА);
- гідравлічний ($I_{ном}$ вище 1 кА).

Вимикання вимикача здійснюється пружинами після роз'єднання розчеплюючого пристрою.

Розчеплювачі автоматів

Розчеплювач – це елемент передачі зусилля, який призначений для контролю параметрів кола, що захищається. Впливаючи на механізм розчеплення, він змушує вимикатися вимикач при відхиленні значення параметра від заданого.

Розчеплювач це реле або елементи реле, що вбудовані у вимикачі із використанням елементів самого вимикача. Залежно від виконання розчеплювачі бувають:

- струмові максимальної миттєвої дії і струмові максимальної сповільненої дії;
- розчеплювачі напруги;
- розчеплювачі зворотного струму – спрацьовують при зміні напрямку струму;
- комбіновані (наприклад тепловий і струмовий).

Розчеплювачі виконуються на базі контактних або безконтактних реле. На сьогодні починають широко застосовуватись напівпровідникові розчеплювачі. При цьому контролюючі і порівнюючі органи розчеплювачів – на базі напівпровідників, а виконавчий орган – на незалежному електромагнітному розчеплювачі.

Електромагнітні розчеплювачі можуть забезпечити миттєву дію і можуть бути розраховані так, що вимикання іде із затримкою часу. Вони – прості за конструкцією, мають високу термічну і електродинамічну стійкість.

Теплові розчеплювачі працюють так само, як працюють теплові реле. Вони розраховані на режим перевантаження.

На рис. 6.4.10 показано схематично електромагнітний розчеплювач магнітної дії.

Коли струм досягає значення струму відсічки, магнітне поле, що створюється в сердечнику, буде притягувати якорь 3, сила, що виникає, буде перевищувати силу натягу пружини, і повернеться вал. Механізм спрацює. В інших автоматах основою механізму розчеплювачів є система важелів, що «ламаються». Розчеплення відбувається за рахунок удару, в якому основну

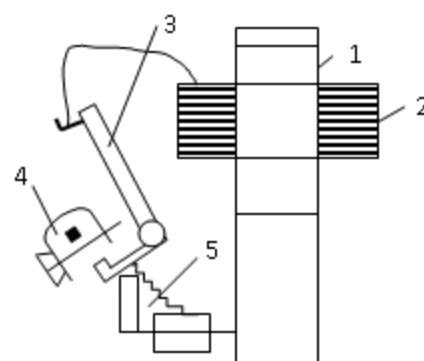


Рис. 6.4.10

роль відіграє кінетична енергія якоря, що накопичена при його русі. Важіль складається із ланок, які складають один жорсткий важіль при відсутності аварійної ситуації. При аварійному режимі (короткого замикання) великий струм, що протікає по обмотці електромагніта викликає втягування якоря в обмотку, його удар по важелю. Важіль ламається. При цьому рукоятка і контактний важіль, до якого кріпиться рухомий контакт, виявляються розчепленими, а контакти розмикаються.

Теплові розчеплювачі застосовують при струмах до 200 А, бо вони мають ряд недоліків, у тому числі залежність від температури навколишнього середовища і значну дисперсію по струму спрацювання. Однак за допомогою теплових розчеплювачів досягається найбільш просто затримка часу від електричного струму.

Час вимикання автоматів

Власний і повний час вимикання є найважливішими характеристиками автомата.

Повний час спрацювання складається із трьох частин:

$$t_{вим} = t_0 + t_1 + t_2$$

де t_0 – час наростання струму до значення струму спрацювання, залежить від установки та по струму спрацювання та швидкості наростання струму, t_1 – час, що витрачається на роботу механізму розчеплення та вибір провалу

контактів. Він триває до моменту розмикання контактів та зумовлений процесами інерційності. Він називається власним часом вимикання автомата, t_2 – час горіння дуги, з моменту розходження контактів, до моменту їх гасіння.

Оскільки основне призначення автоматів розмикати коло, то важлива їх характеристика – це повний час вимикання $t_{вим}$ і власний час вимикання t_1 .

Якщо до моменту розмикання контактів кола струм досягає усталеного стаціонарного значення, то автомат називається звичайним, його час $t_1 \geq 0,01$ с. Такий автомат не забезпечує струмообмеження, і його контактами вимикається струм КЗ.

Якщо ж до розмикання контактів струм не досягає усталеного значення, то автомат вимикає, як правило, струм значно менший струму КЗ. Це полегшує роботу самого автомата і зменшує рівень термічного і електродинамічного навантаження на апаратуру – це швидкодіючий автомат. В швидкодіючих автоматах $t_1 \geq 0,02 - 0,08$ с.

Іноді, якщо струм наростає дуже швидко, до моменту розходження контактів він досягає великих значень. Ефект струмообмеження в даному випадку менший. Тому для досягнення струмообмеження, конструюються автомати з спеціальними пристроями, що реагують на швидкість зміни струму, а не на струм.

Електромагнітні розчеплювачі створені на електромеханічному, термомагнітному, магнітострикційному та інших принципах. У сучасних автоматичних вимикачах застосовують *напівпровідникові розчеплювачі*, які на відміну від електромеханічних мають вищу точність параметрів спрацювання, час спрацювання і пограничний струм, як функцію часу спрацювання (це особливо важливо в режимі повторюваних вимикань).

Сучасні серійні автомати, що застосовуються в народному господарстві, розраховані на різні умови роботи. Тому вони помітно відрізняються по конструкції, вигляду, вартості, залежно від свого призначення. Основний критерій, по якому розділяють автоматичні вимикачі – це номінальні струми і напруги. Як правило, автомати на невеликі струми мають ручний привід, а автомати на високі і надвисокі – електродвигунний. В них пружину, що вмикає «зводить» невеличкий двигун.

Автоматичні вимикачі вибирають виходячи із номінального струму і номінальної напруги, а також із необхідності витримки часу вимикання і величини граничних струмів вимикання.

Контрольні питання

1. Дайте визначення електричної мережі.
2. Яке головне призначення електричних мереж?
5. Дайте визначення номінальної напруги мережі.
7. Дайте визначення нейтралі трансформатора.
8. Назвіть режими нейтралі мереж різних напруг.
9. Назвіть головні елементи повітряної лінії.
10. Назвіть головні елементи кабельної лінії.
11. Назвіть переваги і недоліки кабельних ліній у порівнянні з повітряними.
12. Прокоментуйте складові частини силового кабелю та їх призначення.
13. Назвіть основні типи самоутримних ізольованих проводів.
14. Які переваги мають кабелі з ізоляцією зі ЗПЕ?
15. Назвіть вимоги до електричних мереж.
16. Як поділяються споживачі електроенергії за надійністю електропостачання?
17. Перелічіть розрахунки, які виконують при створенні електромереж.
18. Назвіть умову перевірки за нагрівом проводів і кабелів.
19. Як вибирають переріз проводів і кабелів при захисті лінії електромережі плавкими запобіжниками чи автоматами?
20. Основні види автоматів та їх основні параметри?
21. Призначення електромагнітних розчеплювачів?
22. Призначення теплових розчеплювачів?

Розділ 7

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ

7.1 ЗАСОБИ І ЗАХОДИ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ В НОРМАЛЬНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Захисні заходи, що використовуються в електроустановках поділяються на такі, що використовуються в нормальних і в аварійних режимах роботи електроустановок.

В нормальних режимах роботи електроустановок засоби і заходи електробезпеки є такими.

7.1.1 Електрозахисні заходи

Ізоляція струмоведучих частин електроустановок – це основний захід захисту. Ізоляція буває робоча, подвійна, підсилена.

Робоча ізоляція електроустановок – це електрична ізоляція струмоведучих частин електроустановки, що забезпечує її нормальну роботу і захист від ураження електричним струмом

В процесі експлуатації ізоляція піддається різним ушкодженням (механічним, хімічним, тепловим), а також старінню, в результаті чого погіршуються її властивості – зменшується активний опір. Тому необхідний контроль ізоляції, який проводиться вимірюванням активного опору ізоляції мегомметром. Вимірювання опору ізоляції окремих ділянок мережі, трансформаторів, електродвигунів тощо проводиться на вимкненій установці.

Опір кожної ділянки в мережах напругою до 1000 В повинен бути не менше 0,5 МОм на фазу.

Подвійна ізоляція – це електрична ізоляція, що складається із робочої і додаткової ізоляції. При пошкодженні робочої ізоляції працює додаткова. Це досягається виготовленням корпусів електрообладнання із ізоляційного матеріалу. З подвійною ізоляцією виготовляється апаратура електроустановок (вимикачі, штепселі, розетки, патрони ламп розжарювання тощо).

Підсилена ізоляція – поліпшена робоча, що забезпечує ступінь захисту такий же, як подвійна ізоляція.

Недоступність струмоведучих частин для випадкового дотику забезпечується розміщенням струмоведучих частин на недосяжній висоті і огороженням.

В електроустановках до 1000В розміщення струмоведучих частин на недоступній висоті: всередині приміщення – 3,5м; назовні – 6м.

В електроустановках застосовують як суцільні, так і сітчасті огороження у вигляді кожухів, кришок, чохлів, шаф тощо.

Блокування попереджує помилкові дії персоналу і перекриває доступ до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою. При небезпеці ураження струмом електроустановка автоматично вимикається.

За принципом дії блокування поділяється на електричне, механічне та комбіноване.

Електроблокування здійснює розрив електричного кола спеціальними контактами, які встановлюються на дверцятах огорожень, кришках, дверцятах кожухів.

Блок-контакти при відкриванні дверей огорожень, шаф, кожухів знеструмлюють електропристрій.

При механічному блокуванні включення напруги можливо тільки при закритому замку або заскочки, які механічно пов'язані з вимикачем.

Застосування малої напруги. Малою напругою вважаються напруга не вище 42 В змінного і 110 В постійного струму. Напруга 42 В застосовується в приміщеннях з підвищеною небезпекою, особливо небезпечних і назовні приміщень для живлення ручного інструменту, переносних ламп, верстатних ламп. Напруга 12 В застосовується для живлення переносних ламп в особливо небезпечних приміщеннях при несприятливих умовах (при роботі в металевій ємності, кабельному колодязі тощо).

Джерелом малої напруги є знижувальні трансформатори, акумулятори, батареї гальванічних елементів.

Електричний розподіл мереж спрямований на підвищення захисної дії ізоляції струмопровідних частин, що досягається або зменшенням ємності мереж, або переходом від мереж з заземленою нейтраллю до мереж з ізольованою нейтраллю.

Електричний розподіл мереж здійснюється за допомогою розподільчих трансформаторів, які дозволяють єдину розгалужену мережу з великою ємністю і малим опором ізоляції перетворити в ряд невеликих мереж з малою ємністю і високим опором ізоляції.

Орієнтація в електроустановках – це маркування, попереджувальні сигнали, таблиці, розпізнавальні кольори провідників, шин.

Кольори фаз, шин змінного струму: верхня фаза А – жовтий; середня фаза В – зелений; нижня фаза С – червоний; нульові шини білі. За постійного струму “плюсова” шина – червона, “мінусова” шина – синя.

7.1.2 Електрозахисні засоби

Захисними засобами (ЗЗ) називаються прилади, апарати та пристрої, що служать для захисту працівників (особового складу), які працюють на електроустановках, від поразки електричним струмом, від впливу електричної дуги, продуктів її горіння і т.п.

До захисних засобів, які застосовуються в електроустановках, відносяться:

а) ізолюючі оперативні штанги, що ізолюють кліщі для операцій із запобіжниками, покажчики напруги для визначення наявності напруги з додатковим опором для фазування;

б) ізолюючі сходи, що ізолюють площадки, габаритники, штанги для установки габаритників, що ізолюють тяги, захоплення й інструмент з ізольованими рукоятками;

в) ізолюючі вимірювальні штанги, струмовимірювальні кліщі;

г) гумові діелектричні рукавиці, боти, калоші, килимки, ізолюючі підставки;

д) переносні заземлення;

е) тимчасові огороження, попереджувальні плакати, ізолюючі ковпаки і накладки;

ж) захисні окуляри, брезентові рукавиці, протигази, які фільтрують і ізолюють, запобіжні пояси, страхуючі канати.

Захисні засоби поділяються на ізолюючі та допоміжні.

Ізолюючі захисні засоби служать для ізоляції людини від струмоведучих частин електроустановки, що знаходиться під напругою, а також для ізоляції людини від землі.

Всі ізолюючі захисні засоби поділяються;

а) на основні захисні засоби;

б) на додаткові захисні засоби.

Основними ЗЗ називаються такі захисні засоби, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу електроустановок і за допомогою яких допускається торкатися струмоведучих частин.

Додатковими ЗЗ називаються такі захисні засоби, які самі по собі не можуть при даній напрузі забезпечити безпеку від поразки струмом і є лише додатковим заходом захисту до основних засобів. Вони також служать для захисту від напруги дотику, крокової напруги і є додатковим захисним засобом для захисту від впливу електричної дуги і продуктів її горіння.

До основних ізолюючих захисних засобів в електроустановках напругою вище 1000 В відносяться:

а) ізолюючі штанги;

б) ізолюючі та струмовимірювальні кліщі;

в) покажчики напруги;

г) ізолюючі пристрої та пристосування для ремонтних робіт.

Основні захисні засоби виконуються з ізоляційних матеріалів (порцеляна, бакеліт, ебоніт, гетинакс, пластичні матеріали і т. п) Матеріали, що поглинають вологу (бакеліт, дерево й ін.), повинні бути покриті вологостійким лаком і мати гладку поверхню без тріщин та подряпин. В електроустановках до 15 кВ допускається застосування штанг із порцеляновими ізоляторами як ізолюючу частину.

До додаткових ізолюючих захисних засобів, які застосовуються в електроустановках напругою вище 1000 В, відносяться:

а) діелектричні рукавиці;

б) діелектричні боти;

в) діелектричні гумові килимки;

г) ізолюючі підставки.

До основних ізолюючих захисних засобів, які застосовуються в електроустановках напругою до 1000 В, відносяться:

- а) діелектричні рукавиці;
- б) інструмент з ізольованими рукоятками;
- в) показчики напруги.

До додаткових ізолюючих захисних засобів, які застосовуються в електроустановках напругою до 1000 В, відносяться:

- а) діелектричні калоші;
- б) діелектричні гумові килимки;
- в) ізолюючі підставки.

Вибір тих чи інших ізолюючих захисних засобів для застосування при оперативних перемиканнях або ремонтних роботах регламентується правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок і ліній електропередачі і спеціальних інструкцій на виконання окремих робіт.

Переносні огороження, тимчасові переносні заземлення і попереджувальні плакати призначені для тимчасового огороження струмоведучих частин, а також для попередження помилкових операцій з комутаційними апаратами.

Допоміжні захисні засоби поділяються на огорожуючі, запобіжні, екрануючі ЗЗ.

Огорожуючі ЗЗ – для тимчасового огороження струмоведучих частин. Приклад: щити, тимчасові переносні заземлення, переносні огороження, попереджувальні плакати.

Запобіжні ЗЗ – для індивідуального захисту працюючого від світлових, теплових, механічних впливів. Приклад: захисні окуляри, рукавиці, каски, протигази, пояси, канати.

Екрануючі ЗЗ – для виключення впливу полю промислової частоти. Приклад: екрановані костюми.

Комплектування електроустановок захисними засобами

Працівники, які обслуговують електроустановки, повинні бути забезпечені необхідними захисними засобами, які забезпечують безпеку експлуатації цих електроустановок.

Необхідні захисні засоби повинні знаходитися в якості інвентарних у приміщеннях де є електроустановки (розподільних пристроях і на підстанціях, у приміщеннях акумуляторних установок, у трансформаторних і розподільних пунктах електромереж, у лабораторіях і ін.).

Електроустановки повинні бути укомплектовані необхідними захисними засобами в кількості, що забезпечує виконання всіх можливих у даній установці операцій як у нормальному режимі роботи, так і під час аварій.

Відповідальність за забезпечення електроустановок випробуваними захисними засобами, організацію правильного збереження і створення необхідного резерву їх, за своєчасне проведення періодичних оглядів і випробувань, вилучення непридатних засобів, поповнення наявності й

організацію обліку захисних засобів несуть командир частини, командир підрозділу, їхні заступники по технічній частині, головний інженер, енергетик частини (начальник цеха, служби, підстанції, майстер дільниці, а в загалі по підприємству головний інженер).

Відповідальність за наявність, придатність, правильне збереження і використання захисних засобів несе персонал, який обслуговує електроустановку.

При виявленні непридатних або з простроченим терміном випробувань захисних засобів необхідно негайно вилучити їх і доповісти безпосередньому начальнику і зробити запис в журналі обліку та утримання захисних засобів або в оперативній документації.

Особи, які одержали захисні засоби в індивідуальне користування, відповідають за правильну експлуатацію, своєчасне випробування і відбраковування їх у випадку несправності.

Для збереження захисних засобів обладнується місце з пристосуваннями для їхнього розміщення:

а) гачками для розміщення штанг, переносних заземлень, попереджувальних плакатів;

б) шафами або стелажми для розміщення рукавиць, калош, килимків, захисних окулярів, протигазів і покажчиків напруги.

На місці збереження захисних засобів повинна бути опис цих засобів.

Збереження несправних, невипробуваних і з простроченим терміном випробування захисних засобів разом зі справними і випробуваними забороняється.

Усі захисні засоби при прийманні в експлуатацію повинні бути випробувані незалежно від заводського випробування, а також повинні піддаватися періодичним контрольним оглядам, електричним і механічним випробуванням.

На захисні засоби, що пройшли випробування, крім інструмента з ізолюваними рукоятками, організацією, яка перевіряє, ставиться штамп. Штамп повинний бути добре видний. Він повинний бути вибитий, нанесений незмивною фарбою або наклеєний на ізолюючій частині.

На захисних засобах, що не витримали випробувань або визнані непридатними під час експлуатації, штамп повинний бути перекреслений навхрест червоною фарбою.

Вимоги до електрозахисних засобів

Користування ізолюючими захисними засобами повинне виконуватися тільки по їхньому прямому призначенню в електроустановках напругою не вище того, на яке захисні засоби розраховані.

Всі основні ізолюючі захисні засоби розраховані на застосування їх у відкритих або закритих електроустановках тільки в суху погоду. Тому використання цих захисних засобів на відкритому повітрі в сиру погоду (під

час дощу, снігу, туману) забороняється . Перед кожним застосуванням захисного засобу особовий склад зобов'язаний:

а) перевірити його справність і відсутність зовнішніх ушкоджень, очистити та обтерти від пилу; гумові рукавиці, боти, калоші перевірити на відсутність міхурів і інших сторонніх включень. При виявленні несправності захисний засіб повинний бути негайно вилучене з застосування;

б) перевірити по штампі, для якої напруги припустиме застосування даного засобу і чи не минув термін дії його після випробування. Користування захисними засобами, термін випробування яких минув, забороняється, тому що такі засоби вважаються несправними.

Розглянемо вимоги до окремих видів захисних засобів.

Діелектричні рукавиці. Для робіт в електроустановках допускається застосовувати тільки діелектричні рукавиці, які виготовлені відповідно до вимог ДСТ або технічних умов. Рукавиці, призначені для інших цілей (хімічні й ін.), застосовувати як захисний засіб при роботі в електроустановках забороняється.

Діелектричні рукавиці, які видані для обслуговування електроустановок, повинні бути кількох розмірів. Довжина рукавиці повинна бути не менш 350 мм. Рукавиці одягаються на руки на повну їхню глибину. Не допускається загортати краї рукавичок або спускати поверх них рукава одягу. При роботах на відкритому повітрі в зимовий час діелектричні рукавиці надягають поверх вовняних. Щораз перед застосуванням рукавиці необхідно перевірити на герметичність шляхом заповнення їх повітрям.

Діелектричні боти і калоші. Діелектричні боти і калоші крім виконання функції додаткового захисного засобу є захисним засобом від крокової напруги в електроустановках будь-якої напруги.

На кожній боті і калоші повинні бути слідуєчі надписи: завод виробник; дата випуску; клеймо ВТК; випробувальна напруга; дата випробування.

Боти і калоші, які видані для обслуговування електроустановок, повинні бути кількох розмірів. Боти застосовуються в електроустановках будь-якої напруги, калоші - в електроустановках до 1000 В.

Діелектричні килимки. Діелектричні килимки допускаються використовувати в якості додаткового захисного засобу в закритих електроустановках будь-якої напруги. Діелектричні килимки є ізолюючим засобом лише в сухому стані.

У приміщеннях сирих і з рясним відкладенням пилу замість килимків повинні застосовуватися ізолюючі підставки.

Діелектричні килимки повинні виготовлятися розміром не менше 50х50 см. верхня поверхня килимка повинна бути рифленою.

Інструмент з ізольованими рукоятками. Інструмент з ізольованими рукоятками допускається застосовувати в електроустановках напругою до 1000 В.

Рукоятки інструмента повинні мати покриття з вологостійкого ізоляційного матеріалу. Всі ізолюючі частини інструмента повинні мати гладку поверхню, не мати тріщин, зламів і задирок. Ізоляційне покриття рукояток повинне щільно прилягати до металевих частин інструмента і цілком ізолювати ту його частину, яка під час роботи знаходиться в руці працюючого.

Ізольовані рукоятки повинні забезпечуватися упорами і мати довжину не менше 10 см.

У викруток повинна бути ізольована не тільки рукоятка, але і металевий стрижень на всій його довжині аж до робочого вістря.

При роботах інструментом з ізольованими рукоятками на струмоведучих частинах, що знаходяться під напругою, працюючий повинний мати на ногах діелектричні калоші або стояти на ізолюючій підставі, крім того, він повинний бути в головному уборі з опущеними і застебнутими рукавами одягу. Діелектричні рукавиці при цьому не вимагаються.

Покажчики напруги. Покажчики напруги до 1000 В, що працюють за принципом протікання активного струму є переносним приладом, який призначений для перевірки або відсутності напруги на струмоведучих частинах.

Принцип дії - наявність світла неонові лампи при протіканні через неї струму.

Покажчики напруги є двох типів: двохполюсні та однополюсні.

При роботі двохполюсного потрібен дотик до двох частин електроустановки. Дозволяють вимірювання фазної напруги (220В), лінійної напруги (380В) в електроустановках змінного та постійного струму

При роботі однополюсного потрібен дотик до одної частини електроустановки. Застосовується при пошуку фазного проводу в електроустановках змінного струму. Електричний струм, що проходить скрізь тіло людини, не перевищує 0,6 мА.

Покажчики високої напруги (ПВН) є переносним приладами, заснованими на світінні неонові лампи при протіканні через неї ємнісного струму.

Покажчик напруги складається з трьох основних частин:

- а) власне покажчика, що показує присутність напруги;
- б) ізолюючої частини;
- в) ручки-захоплення.

Власне покажчик складається з неонові лампи і конденсаторів або іскрового проміжку.

При користуванні покажчиком напруги його необхідно підносити до струмоведучих частин електроустановки на відстань, необхідну для прояву світіння лампи. Дотик до струмоведучих частин потрібно тільки у випадку коли, частина електроустановки, що перевіряється знаходиться без напруги.

При користуванні покажчиками напруги повинні застосовуватися діелектричні рукавиці.

Щораз перед застосуванням необхідно провести зовнішній огляд покажчика, після чого перевірити його дію.

Перевірка справності дії проводяться шляхом наближення щупа покажчика до струмоведучої частини, яка заведемо знаходиться під напругою.

Ізолюючі штанги. У залежності від призначення ізолюючі штанги підрозділяються на оперативні, вимірювальні і ремонтні.

Оперативні – для операцій з однополюсними роз'єднувачами, накладки тимчасових заземлень, перевірки відсутності напруги.

Вимірювальні – для виконання вимірів.

Ремонтні – для очищення ізоляторів від пилу, приєднання споживачів до проводів, обрізки гілок дерев.

Ізолюючі штанги можуть бути універсальними, тобто мати змінні голівки, призначені для виконання різних функцій. Ізолюючі штанги складаються з трьох основних частин:

- а) робочої частини;
- б) ізолюючої частини;
- в) ручки-захоплення.

Робоча частина складається з укріпленого безпосередньо на ізолюючій частині наконечника, форма якого залежить від призначення штанга, або приладу для виміру.

Ізолюючою частиною штанги є ділянка від робочої частини до границі захоплення.

Ізолюючою частиною штанги виготовляється з ізоляційних механічно міцних матеріалів.

Зі сторони ручки-захоплення ізолююча частина штанги обмежена упором у вигляді кільця, яке виконано з ізоляційного матеріалу. Діаметр упорного кільця повинен бути на 5-20 мм більш діаметра ручки.

Відрізнати границю між ізолюючою частиною і рукою-захоплення фарбою забороняється.

Ручка-захоплення призначена для того щоб тримати штангу при роботі з нею.

Розміри робочої частини ізолюючих штанг не нормуються.

Однак вони повинні бути такими, щоб при роботі зі штангою виключалася можливість замикання між фазами і на заземлені частини.

В оперативних штангах наконечник робочої частини повинний мати на кінці палець або гачок. Загальна довжина штанг повинна забезпечити вільне користування ними з підлоги або з землі.

Вага оперативної штанги повинна бути такою, щоб забезпечувалася можливість вільної роботи з нею однією людиною.

При роботі зі штангами забороняється торкатися ізолюючої частини за упорним (обмежувальним) кільцем.

У випадку ушкодження лакового покриття штанги або інших її несправностей роботу варто припинити, а штангу відремонтувати і випробувати.

Штанги повинні застосовуватися в закритих електроустановках. На відкритому повітрі застосування їх допускається тільки в суху погоду (при відсутності дощу, снігу, туману). Операції зі штангою повинен виконувати кваліфікований працівник при цьому повинна бути присутня друга людина. При роботі застосовуються діелектричні рукавиці.

Ізолюючі кліщі. Ізолюючі кліщі застосовуються для операцій із запобіжниками при напруги до 35 кВ, а також для надягання і зняття ізолюючих ковпаків з ножів-роз'єднувачів і для інших аналогічних робіт

Ізолюючі кліщі складаються з трьох основних частин:

- а) робочої частини або губок кліщів;
- б) ізолюючої частини губок до упору;
- в) ручки-захоплення – від упору до кінця обценьків .

Всі основні частини обценьків повинні бути виконані з ізоляційного матеріалу. Всі частини повинні бути надійно і жорстко скріплені.

В електроустановках напругою до 10кВ ізолююча частина обценьків повинна бути не менше 0,45м, а довжина ручки-захоплення 0,15м, для електроустановок напругою до 35кВ розміри повинні бути відповідно 0,75 і 0,2 м

Губки обценьків для операцій із запобіжниками повинні мати таку кривизну поверхні, щоб ними можна був надійно і щільно зажати трубчастий патрон запобіжника.

Ізолюючі кліщі повинні застосовуватися в закритих електроустановках, а в суху погоду й у відкритих.

Операції з запобіжниками в ланцюгах напругою вище 1000 В, а також інші операції за допомогою ізолюючих кліщі варто проводити, застосовуючи діелектричні рукавиці

При знятті або постановці запобіжників під навантаженням необхідно користатися, крім того, захисними окулярами

Струмовимірювальні кліщі. Струмовимірювальні кліщі призначені для виміру змінного струму в одиночних провідниках без порушення їхньої цілості

Струмовимірювальні кліщі для електроустановок напругою вище 1000 В складаються з трьох основних частин

- а) робочої частини,
- б) ізолюючої частини від робочої частини до упору;
- в) ручок-захоплення від упору до кінця обценьків

Робоча частина обценьків складається з магнітопроводу з обмоткою і з'ємного або вбудованого амперметра, укріпленого на сердечнику; інші частини виконуються з ізоляційного матеріалу.

Струмовимірювальні кліщі для електроустановок напругою менше 1000 В можуть складатися з двох частин:

- а) робочої частини – рознімного магнітопроводу
- б) ізолюючої частини, яка одночасно є корпусом приладу і рукою-захопленням

Струмовимірювальні кліщі можуть застосовуватися в закритих електроустановках, а також і у відкритих – у суху погоду.

При роботі з струмовимірювальними обценьками їх варто тримати в руках у висячому положенні і не торкатися інших струмоведучих або заземлених частин електроустановки.

Переносні заземлення. Переносні заземлення при відсутності стаціонарних ножів, що заземлюють, є найбільш надійним засобом захисту при роботі на відключених ділянках устаткування або лінії на випадок помилкової подачі напруги на відключену ділянку або появи на ньому наведеної напруги.

Переносні заземлення складаються з наступних частин:

а) проводів для заземлення і для закорочування між собою струмоведучих частин усіх трьох фаз установки

Допускається застосування окремого переносного заземлення для кожної фази

б) затисків для приєднання заземлюючих проводів до заземлювальної шини і закорочуючих проводів до струмоведучих частин.

Переносні заземлення повинні задовольняти наступним умовам:

а) проводи для закорочування і для заземлень повинні бути виконані з гнучких неізолюваних мідних жил і мати перетин, що задовольняє вимогам термічної стійкості при коротких замиканнях, але не менше 25 мм² в електроустановках напругою вище 1000 В и не менше 16 мм² в електроустановках до 1000 В;

б) затиски для приєднання закорочуючих проводів до шин повинні бути такої конструкції, щоб при проходженні струму короткого замикання переносне заземлення не могло бути зірване з місця електродинамічними зусиллями;

в) наконечник на проводі для заземлення повинний бути виконаний у виді струбцини або відповідати конструкції затиску (баранчика);

г) усі приєднання елементів переносного заземлення повинні бути виконані міцно і надійно шляхом опресовування, зварювання або зболчування з наступною пайкою. Застосування однієї тільки пайки забороняється.

При накладенні заземлення спочатку приєднують заземлюючий провід до «землі», потім перевіряють відсутність напруги на струмоведучих частинах, що заземлюються, після чого затиски закорочуючих проводів за допомогою штанги накладають на струмоведучі частини і закріплюють там цією же штангою або руками в діелектричних рукавицях. Зняття заземлення виконується в зворотному порядку. Всі операції по накладенню і зняттю переносних заземлень повинні виконуватися з застосуванням діелектричних рукавиць.

Попереджувальні плакати. Попереджувальні плакати повинні застосовуватися для:

- попередження про небезпеку наближення до частин, які знаходяться під напругою;

- заборони дії з комутаційними апаратами в наслідок чого може бути подана напруга на місце роботи;
- вказівки працюючому особовому складу підготовленого до роботи місця;
- нагадування про вжиті заходи безпеки.

Плакати поділяються на чотири групи:

а) застережливі: "Висока напруга. Небезпечно для життя"; "Під напругою. Небезпечно для життя"; "Стій висока напруга"; "Не вилазь - уб'є"; "Стій - небезпечно для життя"

б) що забороняють: "Не включати – працюють люди"; "Не відкривати. Працюють люди".

в) що дозволяють: "Працювати тут"; "Вилазити тут".

г) що нагадують: "Заземлено"

По характері застосування плакати можуть бути постійні і переносні.

Захисні окуляри. Захисні окуляри застосовуються при:

- а) зміні запобіжників;
- б) різанню кабелів і розкритті муфт на кабельних лініях, які знаходяться в експлуатації;
- в) пайці, зварюванню (на проводах, шинах, кабелях і ін.), варінню і розігріванні мастики і заливанню нею кабельних муфт, введень і т.п.;
- г) проточці і шліфуванню кілець і колекторів;
- д) роботі з електролітом і обслуговуванні акумуляторних батарей;
- е) заточенню інструмента й інших робіт, зв'язаних з небезпекою ушкодження очей.

7.2 ЗАХИСНЕ ЗАЗЕМЛЕННЯ

7.2.1 Призначення та принцип дії захисного заземлення

Захисне заземлення— навмисне електричне з'єднання з землею або з її еквівалентом металевих не струмоведучих частин, що можуть виявитися під напругою внаслідок замикання на корпус. Еквівалентом землі може бути вода або ріки, моря, кам'яне вугілля.

Призначення захисного заземлення — усунення небезпеки поразки струмом у випадку дотику до корпусу електроустановки й іншим не струмоведучим металевим частинам, які опинилися під напругою внаслідок замикання на корпус і з інших причин.

Захисне заземлення варто відрізнити від робочого заземлення і заземлення блискавкозахисту.

Робоче заземлення— навмисне з'єднання з землею окремих точок електричного кола, наприклад нейтральних точок обмоток генераторів, силових і вимірювальних трансформаторів і т.д. Робоче заземлення призначене для забезпечення належної роботи електроустановки в нормальних чи аварійних умовах і здійснюється безпосередньо (тобто шляхом з'єднання провідником частин, що заземлюються, із заземлювачем)

або через спеціальні апарати — пробивні запобіжники, розрядники, резистори і т.п.

Заземлення блискавкозахисту навмисне з'єднання з землею блискавкоприймачів і розрядників з метою відводу від них струмів блискавки в землю.

Принцип дії захисного заземлення — зниження до безпечних значень напруг дотику і кроку, обумовлених замиканням на корпус та іншими причинами.

Це досягається: шляхом зменшення потенціалу заземленого устаткування (зменшенням опору заземлювача); шляхом вирівнювання потенціалів основи і заземленого устаткування (тобто підйомом потенціалу основи, на якій стоїть людина, до значення, близького до значення потенціалу заземленого устаткування).

При цьому більша частина струму замикання на землю пройде через заземлювач ($R_3 = 4 \text{ Ом}$) і тільки незначна частина — крізь тіло людини ($R_h = 1000 \text{ Ом}$)

Захисне заземлення застосовується у мережах з ізольованою нейтраллю до 1000 В і вище (рис. 7.2.1) та у мережах із заземленою нейтраллю вище 1000 В (рис. 7.2.2).

Позначення на рисунках такі:

- 1 - устаткування що заземлюється;
- 2 - заземлювач захисного заземлення;
- 3 - заземлювач робочого заземлення;
- r_0 і r_3 - опір робочого і захисного заземлень.

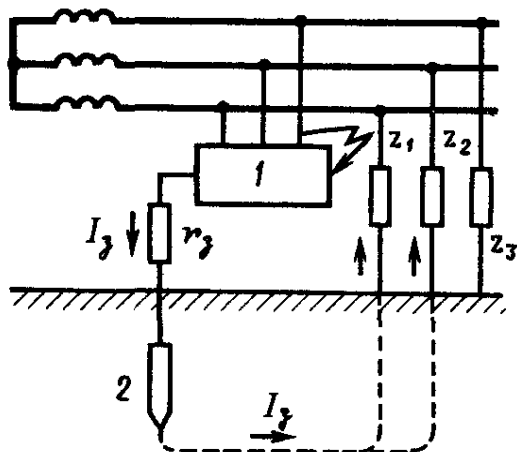


Рис. 7.2.1

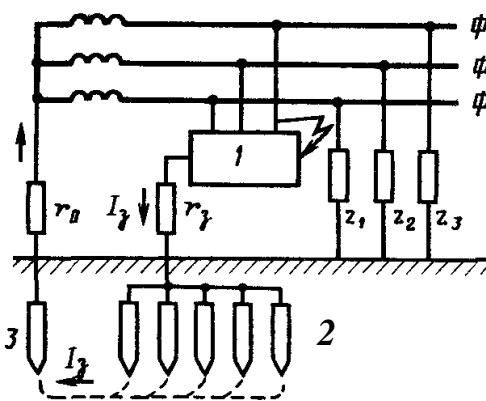


Рис. 7.2.2

Захисне заземлення є найбільше простим і ефективним заходом захисту від поразки струмом з появою напруги на металевих не струмоведучих частинах.

7.2.2 Основні типи заземлюючих пристроїв

Заземлюючим пристроєм називається сукупність заземлювача - провідників (електродів), з'єднаних між собою і заземлюючих провідників.

При цьому провідники (електроди) знаходяться в безпосередній зіткненні з землею, а заземлюючі провідники з'єднують частини електроустановки, що заземлюються, із заземлювачем.

У залежності від місця розміщення заземлювача розрізняють два типи заземлюючих пристроїв: виносні та контурні.

Виносний заземлюючий пристрій характеризується тим, що заземлювач винесено за межі площадки, на якій розміщене устаткування, що заземлюється. Виносний заземлюючий пристрій називають також зосередженим.

Істотний недолік виносного заземлюючого пристрою - віддаленість заземлювача від устаткування, що захищається. Тому такі пристрої застосовуються лише при малих струмах замикання на землю, зокрема в установках до 1000 В, де потенціал заземлювача не перевищує значення припустимої напруги дотику.

Наступний недолік - при великій відстані до заземлювача може значно зрости опір заземлюючого пристрою за рахунок опору з'єднувального провідника.

Перевагою виносного заземлюючого пристрою є можливість вибору місця розміщення електродів заземлювача з найменшим опором ґрунту (сире, глинисте, у низинах і т.п.).

Необхідність у пристрою виносного заземлення може виникнути в наступних випадках:

при неможливості розмістити заземлювач на території, що захищається;

при високому опорі землі на даній території (наприклад, піщаний або скелястий ґрунт) і наявності поза цією територією місць з кращою провідністю землі;

при розосередженому розташуванні устаткування, що заземлюється, (наприклад, у гірських виробленнях) і т.п.

Контурний заземлюючий пристрій характеризується тим, що електроди його розміщуються по контуру (периметру) площадки, на якій знаходиться устаткування, що заземлюється, а також усередині цієї площадки. Як правило електроди розподіляються на площадці рівномірно, і тому контурний заземлюючий пристрій називається також розподіленням.

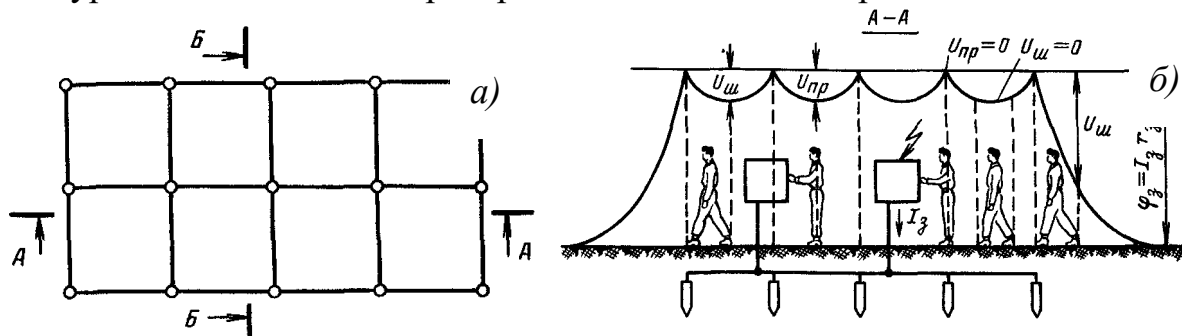


Рис. 7.2.3

Безпека при розподіленому заземлюючому пристрої забезпечується зменшенням потенціалу заземлювача і вирівнюванням потенціалу на

території, що захищається. Це дозволить знизити напруги дотику і кроку. Це досягається шляхом відповідного розміщення одиночних заземлювачів на території, що захищається.

Відповідно до плану контурного заземлюючого пристрою (рис.7.2.3 а) розглянемо розподіл потенціалу в момент замикання фази на заземлений корпус на відкритій підстанції в перетині А-А (рис. 7.2.3 б).

Зміна потенціалу в межах площадки, на якій розміщені електроди заземлювача, відбувається плавно. При цьому напруга дотику $U_{пр}$ і напруга кроку $U_{к}$ мають невеликі значення в порівнянні з потенціалом заземлювача $\phi_з$. Однак за межами контуру по його краях спостерігається крутий спад ϕ , що приводить до збільшення напруги кроку.

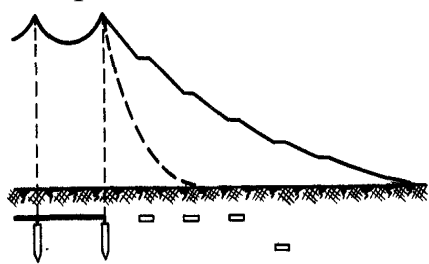


Рис. 7.2.4

Щоб його виключити по краях контуру за його межами укладають у землю на різній глибині додаткові сталеві смуги, які з'єднані з заземлювачем. Завдяки цьому спад потенціалу в цих місцях відбувається по пологій кривій (рис. 7.2.4).

Усередині приміщень вирівнювання потенціалу відбувається природним шляхом завдяки металевим конструкціям, зв'язаним з

мережею заземлення.

Виконання заземлюючих пристроїв

Розрізняють *заземлювачі* штучні, призначені винятково для цілей заземлення, і природні— металеві предмети іншого призначення, що знаходяться у землі.

Для штучних заземлювачів застосовують як правило вертикальні і горизонтальні електроди.

Для вертикальних електродів використовують сталеві труби діаметром 5 — 6 см з товщиною стінки не менш 3,5 мм і кутову сталь з товщиною полиць не менш 4 мм (як правило це кутова сталь розміром від 40 x 40 до 60 x 60 мм) відрізками довжиною 2,5—3,0 м. Широке застосування знаходить також пруткова сталь діаметром не менш 10 мм, довжиною до 10 м, а іноді і більш.

Для зв'язку вертикальних електродів і в вигляді самостійного горизонтального електрода застосовують смугову сталь перетином не менш 4x12 мм і сталь круглого перетину діаметром не менш 6 мм.

Розміщення електродів виконують відповідно до проекту. Заземлювачі не слід розміщати поблизу гарячих трубопроводів і інших об'єктів, що викликають висихання ґрунту, а також у місцях, де можливе просочення ґрунту нафтою, оліями і т.п., оскільки в таких місцях опір ґрунту різко зростає.

У випадку небезпеки посиленої корозії заземлювачів необхідно застосовувати електроди збільшеного перетину або оцинковані чи обміднені.

Для установки вертикальних заземлювачів попередньо риють траншею глибиною 0,7 — 0,8 м, після чого електроди забивають механізмами.

Верхні кінці занурених у землю вертикальних електродів з'єднують сталеву смугою на зварюванні.

Траншеї засинають землею, очищеною від щебню і будівельного сміття, з наступним ретельним трамбуванням, що знижує опір розтіканню заземлювача, а отже, дає економію металу.

Як природні заземлювачі можуть використовуватися прокладені в землі водопровідні та інші металеві труби (за винятком трубопроводів паливних рідин і вибухонебезпечних газів), обсадні труби артезіанських колодязів і т.п.; металеві і залізобетонні конструкції будинків і споруджень, що мають з'єднання з землею; свинцеві оболонки кабелів, прокладених у землі і т.п.

Природні заземлювачі володіють, як правило, малим опором розтіканню струму, і тому їх використання для заземлення дає економію металу.

Природні заземлювачі можна використовувати без штучних, якщо вони забезпечують необхідний за вимогою ПУЕ опір розтіканню струму.

Недоліками природних заземлювачів є доступність деяких з них не електротехнічному персоналу і можливість порушення безперервності з'єднання протяжних заземлювачів (при ремонтних роботах і т.п.).

Для заземлюючих провідників застосовують, як правило, смугову сталь і сталь круглого перетину

Приєднання устаткування, що заземлюється, до магістралі заземлення здійснюється за допомогою окремих провідників. При цьому послідовне включення устаткування, що заземлюється, не допускається.

Магістралю заземлення називається провідник, що заземлює, із двома і більше відгалуженнями.

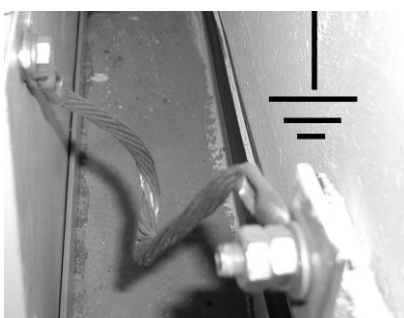


Рис. 7.2.5

З'єднання заземлюючих провідників між собою, а також із заземлювачами та конструкціями, що заземлюються, виконуються, як правило, зварюванням, а з корпусами апаратів, машин і іншого устаткування - зварюванням або за допомогою болтів. При цьому приєднання магістралі до заземлювача - штучного або природного - виконується в двох місцях.

Захисне заземлення може мати маркування літерою *E* «earthing», та позначається знаком

(рис. 7.2.5).

Устаткування, яке підлягає захисному заземленню

Захисному заземленню підлягають металеві не струмоведучі частини електроустаткування, що унаслідок несправності ізоляції й інших причин можуть виявитися під напругою і до яких можливий дотик людей і тварин.

У приміщеннях з підвищеною небезпекою й особливо небезпечних, а також у зовнішніх установках заземлення обов'язкове при номінальній напрузі електроустановки вище 42 В перемінного і 110 В постійного струму, а в приміщеннях без підвищеної небезпеки — при напрузі 380 В и вище перемінного і 440 В и вище постійного струму.

Захисне заземлення *виконується*:

- в електроустановках напругою 380 В та вище змінного та 440 В і вище постійного струму в усіх випадках;
- в приміщеннях із підвищеною небезпекою, особливо небезпечних і зовнішніх електроустановок за номінальної напруги вище 42 В змінного та 110 В постійного струму;
- при змінному і постійному струмі в вибухонебезпечних приміщеннях.

7.3 ЗАХИСНЕ ЗАНУЛЕННЯ

7.3.1 Призначення, принцип дії та принципова схема занулення

Зануленням називається примусове електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою.

Занулення має захищати від ураження електричним струмом при дотику до не струмоведучих металевих частин електроустаткування, що опинилося під напругою, та застосовується в електроустановках напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю (трифазних чотирипровідних) або з глухозаземленим виводом джерела однофазного струму.

Принцип дії занулення –перетворення замикання на корпус в однофазне коротке замикання(замикання між фазним і нульовим захисним провідниками.) з метою викликати більший струм. Цей струм здатний забезпечити спрацьовування захисту (запобіжники, автоматичні вимикачі) і тим самим автоматично відключити ушкоджену установку від мережі. Крім того, оскільки занулені корпуси заземлені через нульовий захисний провідник, то в аварійний період (з моменту виникнення замикання на корпус і до автоматичного вимикання) виявляється захисна властивість цього заземлення, як і при захисному заземленні. Тобто заземлення корпусів через нульовий провідник знижує в аварійний період їхню напругу

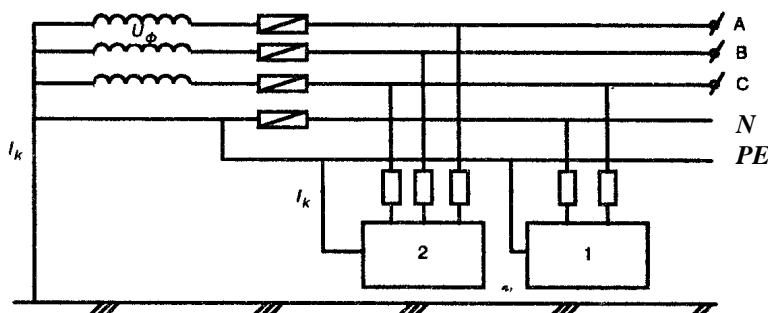


Рис. 7.3.1

щодо землі (розподіл напруги).

Таким чином, занулення зменшує напругу дотику та обмежує час, протягом якого людина, що торкнулася корпусу, може потрапити під дію напруги.

У мережі із зануленням треба розрізняти захисний провід (PE) та нейтральний провід (N).

Захисним проводом називається провід, що з'єднує занулені частини із заземленою нейтральною точкою обмотки джерела струму або її еквівалентом.

Нейтральним називається провід, що використовується для живлення струмом електроприймачів і також з'єднання із заземленою нейтраллю трансформатора або генератора (рис. 7.3.1).

Щоб забезпечити швидке відключення аварійної ділянки, струм короткого замикання повинен бути достатньо великим. Згідно з вимогами ПУЕ струм короткого замикання повинен не менше ніж у 3 рази перевищувати номінальний струм плавкої вставки найближчого запобіжника або номінальний струм нерегульованого роз'єднувача автоматичного вимикача.

У такий спосіб занулення здійснює дві захисних дії – швидке автоматичне відключення ушкодженої установки від мережі і зниження напруги занулених металевих не струмоведучих частин, які опинилися під напругою щодо землі.

Нейтральний провідник повинен, як правило, мати ізоляцію, рівноцінну ізоляції фазних провідників; перетин його повинно бути розраховане на тривалий шлях робочого струму.

Наприклад, для цілей освітлення в квартиру вводяться два дроти - один фазний, за яким струм подається до світильників, а другий нейтральний, за яким струм повертається в зовнішню мережу. Ці дроти однакові: вони мають рівноцінну ізоляцію і провідність.

Призначення занулення - усунення небезпеки ураження струмом в разі дотику до корпусу електроустановки та іншим металевих неструмоведучих частин, які виявились під напругою щодо землі внаслідок замикання на корпус і з інших причин.

Принцип дії занулення - перетворення замикання на корпус в однофазне коротке замикання з метою викликати великий струм, здатний забезпечити спрацьовування захисту і тим самим автоматично відключити пошкоджену електроустановку від мережі живлення. Таким захистом є: плавкі запобіжники або автомати максимального струму, що встановлюються для захисту від струмів короткого замикання; магнітні пускачі з вбудованим тепловим захистом; контактори в поєднанні з тепловими реле, які здійснюють захист від перевантаження; автомати з комбінованими розщеплювачами, які здійснюють захист одночасно від струмів короткого замикання і перевантаження.

Крім того, оскільки занулені корпуси або інші не струмопровідні металеві частини, заземлені через захисний провідник, то в аварійний

період з моменту виникнення замикання на корпус і до автоматичного відключення пошкодженої електроустановки від мережі, проявляється захисна властивість цього заземлення, як при захисному заземленні. Інакше кажучи, заземлення корпусів через нейтральний провідник знижує в аварійний період їх напругу щодо землі.

Таким чином, занулення здійснює два захисних дії - швидке автоматичне відключення пошкодженої установки від мережі живлення і зниження напруги занулених металевих неструмоведучих частин, які опинилися під напругою, щодо землі.

При цьому відключення здійснюється лише при замиканні на корпус, а зниження напруги - у всіх випадках виникнення напруги на занулених металевих неструмоведучих частинах, в тому числі при замиканні на корпус, електростатичному і електромагнітному впливах сусідніх ланцюгів, виносі потенціалу від інших електроустановок тощо.

Область застосування занулення - трифазні чотирипровідні мережі до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю, в тому числі найбільш поширені мережі напругою 380/220 В, а також мережі 220/127 і 660/380 В. Занулення застосовується і в трьохпровідних мережах постійного струму з глухозаземленою середньою точкою обмотки джерела енергії, а також в однофазних двопровідних мережах змінного струму з глухозаземленим виводом обмотки джерела струму.

Таким чином, призначення занулення - швидке автоматичне відключення пошкодженої електроустановки та зниження напруги занулення конструкцій під час замикання їх на корпус.

Основним недоліком системи занулення є сповільнена дія вимикаючих апаратів.

Переріз провідників занулення повинні вибиратися таким чином, щоб при замиканні на корпус виникав струм короткого замикання, що перевищує номінальний струм пристрою максимального струмового захисту:

Розрахунок занулення складається з трьох частин: розрахунку на вимикальну спроможність; визначення максимальної напруги корпусу обладнання відносно землі при замиканні на корпус; а також розрахунку заземлення нейтралі трансформатора і повторного заземлення нульового проводу.

Вимоги щодо застосування занулення залежно від величини напруги і категорії приміщень за небезпекою електротравм аналогічні вимогам до застосування захисного заземлення. За величиною напруги мережі живлення застосування занулення обмежується напругою 1000 В.

7.3.2 Системи заземлення трифазних електричних мереж змінного струму напругою до 1000 В у відповідності до вимог МЕК

Світовий досвід із забезпечення електробезпеки узагальнений у стандартах Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК). Вимоги стандартів ураховані в останній редакції ПУЕ.

Згідно з ДСТУ, системи заземлення трифазних електричних мереж змінного струму напругою до 1000 В поділяються на типи TN, TT та IT.

Буквені позначення типу заземлення системи означають:

перша буква – характер заземлення джерела живлення:

T (від лат. «terra»– земля) – безпосереднє приєднання однієї точки струмопровідних частин джерела живлення до заземлюючого пристрою. У трифазних мережах такою точкою, як правило, є нейтраль джерела живлення, у трипроводових мережах однофазного струму та постійного струму – середня точка, у двопроводових мережах – один з виводів джерела однофазного струму або один з полюсів джерела постійного струму;

I (від англ. «isolated» – ізольований) – усі струмовідні частини джерела живлення ізольовані від землі або одна точка заземлена через великий опір (наприклад через опір приладів контролю ізоляції);

друга буква – характер заземлення відкритих провідних частин електроустановки:

N (від англ. «neutral» – нейтраль) – безпосередній зв'язок відкритих провідних частин електроустановки з точкою заземлення джерела живлення;

T – безпосередній зв'язок відкритих провідних частин із землею незалежно від характеру зв'язку джерела живлення із землею.

Наступні букви в системі TN означають улаштування нейтрального N і захисного PE - провідників:

S (від англ. «separate» – роз'єднувати) – функції N- і PE- провідників виконують окремі провідники;

PE (від англ. «protective earthing» – захисне заземлення) – захисний провідник в електроустановках напругою до 1кВ, призначений для захисту від ураження електричним струмом;

C (від англ. «combine» – об'єднувати) – функції N- і PE- провідників виконує один PEN- провідник.

PEN- провідник – провідник в електроустановках напругою до 1кВ, який об'єднує в собі функції захисного (PE) і нейтрального (N) провідників. Термін «нейтральний» та «захисний» провідники в системі TN є синонімами відповідних термінів «нульовий робочий» та «нульовий захисний» провідники, які використовувались у попередніх редакціях ПУЕ. Вони не відповідають термінам міжнародних стандартів.

Система заземлення TN. Це система, у якій мережа живлення має глухе заземлення однієї точки струмовідних частин джерела живлення, а всі відкриті провідні частини електроустановки, які доступні торканню, приєднуються до цієї точки за допомогою N- або PE- провідників.

У залежності від улаштування нейтрального і захисного провідників розрізняють три модифікації такої системи:

TN-C – система TN, в якій N- і PE-провідники об'єднані в одному PEN-провіднику вздовж усієї мережі (рис. 7.3.2);

TN-S – система TN, у якій N- і PE-провідники працюють роздільно вздовж усієї мережі (рис. 7.3.3);

TN-C-S – система TN, у якій N- і PE-провідники об'єднані в одному провіднику в частині мережі, починаючи від джерела живлення (рис. 7.3.4).

Системи заземлення типу TN є найбільш поширеними. При цьому їх модифікація TN-C найбільш розповсюджена, оскільки вона є найдешевшою. Це обумовлено тим, що прокладається тільки один провідник, який виконує функції одночасно захисного і робочого провідників. Однак у теперішній час необхідно застосовувати мережі із системою заземлення TN-C-S або TN-S.

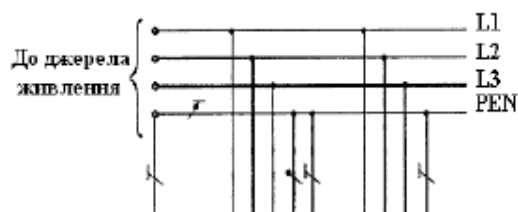


Рис. 7.3.2

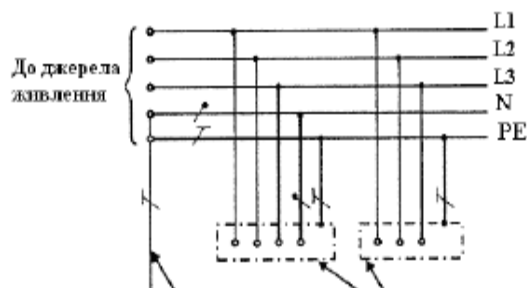


Рис. 7.3.3

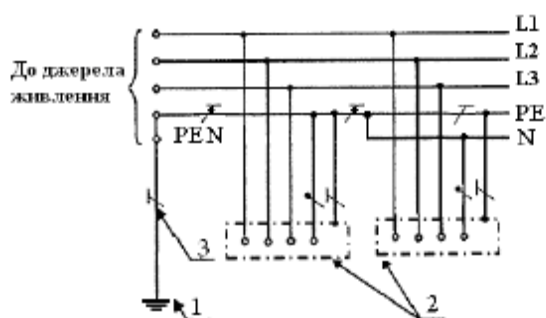


Рис. 7.3.4

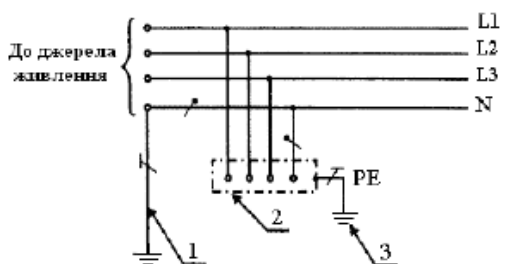


Рис. 7.3.5

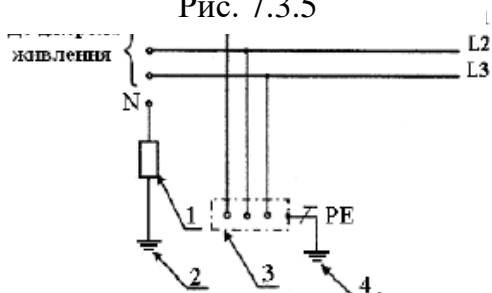


Рис. 7.3.6

У стаціонарних електроустановках функцію нейтрального N та захисного PE провідників можна поєднувати в одному провіднику PEN (система TN-C або частина системи TN-C-S), якщо переріз провідника PEN не менше 10 мм^2 – для міді, 16 мм^2 – для алюмінію.

Якщо, починаючи з якої-небудь точки мережі, захисний і нейтральний провідники розділені (система TN-S або частина системи TN-C-S), забороняється об'єднувати їх за цією точкою. PEN-провідник, що поєднує функції робочого і захисного провідників, повинен вмикатися до затискача, призначеного для захисного провідника PE. Використання сторонніх провідних частин як PEN-провідник заборонено.

Застосування системи заземлення TN-S не тільки підвищує рівень електробезпеки, але й дозволяє широко використовувати пристрої захисного відмикання, що керуються диференційними струмами.

Система заземлення TT – система, у якій одна точка струмовідних частин джерела живлення заземлена, а відкриті провідні частини електроустановки приєднані до РЕ-провідника, який з'єднаний із заземлювачем. Причому цей заземлювач електрично незалежний від заземлювача, до якого ввімкнена точка струмовідних частин джерела живлення (рис. 7.3.5).

Система заземлення IT – система у якій мережа живлення ізольована від землі або заземлена через прилади з великим опором, а відкриті провідні частини електроустановки приєднано до заземленого РЕ-провідника (рис. 7.3.6).

7.4 ЗАХИСНЕ ВІДКЛЮЧЕННЯ

Призначення захисного відключення – відключення електроустановки у разі пошкодження ізоляції і переході напруги на неструмовідні її елементи. Застосовується в доповнення до захисного заземлення (занулення) для забезпечення надійного захисту, перш за все в умовах особливої небезпеки електротравм.

Ефективність захисного заземлення залежить від опору заземлюючого пристрою розтіканню струму замикання на землю. За наявності сухого чи скельного ґрунту опір заземлюючого пристрою розтіканню струму за певних умов може перевищувати допустимі значення з відповідною втратою захисних функцій. Тому в подібних випадках доцільно застосовувати захисне відключення.

Ефективність занулення залежить від опору мережі короткого замикання при переході напруги на неструмовідні частини. При значній протяжності мережі живлення її опір струму короткого замикання (КЗ) збільшується, а абсолютне значення струму короткого замикання може бути недостатнім для спрацювання захисту від КЗ.

Захисне заземлення і занулення мають істотні недоліки:

- вони не захищають від дотику до фази;
- при пробиванні фази на один корпус всі корпуси, приєднані до системи заземлення, опиняються під напругою;
- виникають серйозні труднощі при здійсненні захисного заземлення і занулення в високоомних ґрунтах і пересувному обладнанні.

Цих недоліків позбавлений інший спосіб захисту – захисне відключення.

Захисне відключення – це система захисту, яка автоматично вимикає електрообладнання при виникненні небезпеки ураження людини електрострумом

Така небезпека виникає:

- при переході напруги на корпус електроустановки;
- при переході вищої напруги в бік нижчої;
- при випадкових дотиках;
- при небезпечному наближенні людини до струмопровідних частин.

Основними частинами пристроїв захисного відключення (ПЗВ) є прилад захисного відключення і автоматичний вимикач. Прилад складається з

елементів, які реагують на зміни певного параметра електричного кола, а саме:

- датчик, що сприймає зміну параметра і перетворює його в сигнал;
- підсилювач сигналу датчика;
- коло контролю справності датчика;
- допоміжні елементи.

При спрацюванні приладу виконавчий механізм автоматично вимикає силове коло живлення електрообладнання. В мережах до 1000 В в якості автоматичного вимикача застосовують:

- контактори з електромагнітним управлінням у вигляді котушки, що тримає контакти ввімкненими;
- магнітні пускачі – трифазні контактори змінного струму;
- автоматичні повітряні і масляні вимикачі.

Відключення пошкодженої установки відбувається протягом 0,2...0,25 секунди. Пристрої захисного відключення застосовуються в підземному електрообладнанні, в пересувних електроустановках, що працюють на високоомних ґрунтах, при використанні ручного електроінструменту тощо.

7.4.1 Класифікація ПЗВ

Всього розрізняють 9 класів схем пристроїв захисного відключення в залежності від вхідної величини, на зміну якої реагують їх чутливі елементи. Найбільш прості схеми реагують на зміну напруги корпусу відносно землі і на зміну струму замикання на землю.

Для класифікації ПЗВ пропонується використовувати такі класифікаційні ознаки: режим нейтралі джерела живлення електроустановки; рід і частота струму; напруга; число фаз (полюсів); мобільність; спосіб захисту від зовнішніх впливів; спосіб монтажу.

У залежності від *режиму нейтралі* джерела живлення електроустановки ПЗВ підрозділяють на пристрої, призначені для електроустановок з ізолюваною і з глухозаземленою нейтраліями.

За родом і частотою струму ПЗВ підрозділяють на ті, що призначені для електроустановок:

- змінного струму частотою 50 Гц;
- змінного струму непромислової частоти;
- постійного струму;
- випрямленого струму;
- двох і більшої кількості струмів із числа зазначених вище.

За умовами функціонування при наявності складових постійного струму розрізняють:

- ПЗВ типу АС, що реагують на синусоїдальний змінний диференціальний струм, що повільно наростає, або виникає стрибком;
- ПЗВ типу А, що реагують як на синусоїдальний змінний диференціальний струм, так і на пульсуючий постійний диференціальний струм, котрий повільно наростає, або виникає стрибком.

За наявності затримки за часом розділяють:

- ПЗВ без витримки часу – тип загального застосування;
- ПЗВ з витримкою часу – тип S (селективний).

ПЗВ, які призначені для відключення електроустановок при дотику людини до частин, що знаходяться під напругою, підрозділяють на пристрої, розраховані на електроустановки наступних класів напруг:

- змінного струму частотою 50 (60) Гц – 220, 380, 500, 660, 1000 В;
- змінного струму частотою 400 Гц – 200 В;
- постійного (випрямленого) струму – 110, 220, 275, 400 В.

ПЗВ, призначені для відключень електроустановки при виникненні в ній струму витоку, підрозділяють на пристрої, розраховані на електроустановки вищевказаних класів напруг, а також 6000 і 10000 В частотою 50 (60) Гц.

За числом фаз (полюсів) ПЗВ підрозділяють на однофазні (однополюсні); двофазні (двополюсні); трифазні (триполюсні, чотириполюсні).

За мобільністю електроустановок ПЗВ поділяють на пристрої, призначені для електроустановок: стаціонарних, пересувних, переносних, ручних.

За видом вхідного сигналу слід розрізняти ПЗВ, що реагують на струм нульової послідовності; напругу нульової послідовності; суму, різницю, фазові співвідношення між струмом і напругою нульової послідовності (чи виділених гармонік напруги і струму), а також між струмом або напругою нульової послідовності і фазових напруг мережі; струм витоку; напругу корпусу відносно землі; оперативний струм (постійний, змінний непромислової частоти), що накладається на робочий струм електроустановки; два і більше перераховані фактори (багатофакторні ПЗВ).

У залежності від можливості регулювання уставок розрізняють ПЗВ з регульованими і з нерегульованими уставками.

У свою чергу ПЗВ з регульованими уставками підрозділяють на ПЗВ з плавним регулюванням уставок; з дискретним регулюванням уставок; з комбінованим регулюванням уставок.

За способом контролю справності розрізняють ПЗВ, у яких передбачений: самоконтроль і ручний контроль; такі, в яких є тільки ручний контроль.

У залежності від необхідності використовувати поряд з ПЗВ інші засоби захисту розрізняють ПЗВ, що застосовуються разом із зазначеними засобами – і без них.

За вибірковістю дії ПЗВ підрозділяють на селективні і неселективні.

У залежності від способу захисту від зовнішніх впливів ПЗВ випускають у захищеному й у незахищеному виконанні, для експлуатації яких необхідна захисна оболонка.

За способом монтажу розрізняють ПЗВ поверхневого монтажу; ПЗВ утопленого монтажу; ПЗВ панельно–щитового монтажу.

За класифікацію МЕК (ІЕК) загальна назва ПЗВ residual current protective device – RCD – захисний пристрій по диференціальному струму.

7.4.2 Принцип дії ПЗВ

Більшість ПЗВ, що знаходяться сьогодні в експлуатації, мають структурну схему, представлену на рис. 7.4.1. Основним функціональним блоком ПЗВ є диференціальний трансформатор струму 1. Граничний елемент 2, як правило, є чутливим магнітоелектричним реле прямої дії або напівпровідниковим реле. Виконавчий механізм 3 містить спусковий механізм і силову контактну групу для розмикання електричного кола.

Для проведення періодичного контролю працездатності ПЗВ, використовується коло тестування 4. При натисканні кнопки «Тест» у колі виникає диференціальний струм, який має викликати спрацювання ПЗВ та відключення кола, що захищається.

Принцип дії ПЗВ полягає в наступному. У нормальному режимі в силовому колі по провідниках, що проходять крізь вікно магнітопроводу трансформатора струму, протікає робочий струм навантаження. Ці провідники, створюють зустрічно включені первинні обмотки диференціального трансформатора струму. Рівні за величиною струми I_1 і I_2 у зустрічно включених обмотках наводять у магнітному сердечнику трансформатора магнітні потоки Φ_1 і Φ_2 , які дорівнюють один одному, але зустрічно спрямовані. Результируючий магнітний потік у вторинній обмотці диференціального трансформатора буде дорівнювати нулю, відповідно струм у вторинній обмотці також дорівнює нулю. Пусковий орган у цьому випадку знаходиться в стані спокою.

До магнітного осердя диференціального трансформатора ставляться високі вимоги – лінійність характеристики намагнічування, висока чутливість, температурна і часова стабільність і т.д. У зв'язку з цим для виготовлення магнітопроводів застосовується спеціальне високоякісне аморфне (некристалічне) залізо.

При дотику людини до відкритих струмопровідних частин або до корпусу електроприймачу, де відбувся пробій ізоляції, по фазному провіднику, що проходить через ПЗВ, крім струму навантаження I_1 протікає додатковий струм – струм витіку I_{Δ} . Виникає нерівність струмів у первинних обмотках, що супроводжується нерівністю магнітних потоків. У результаті цього у вторинній обмотці виникає диференціальний струм. Коли величина цього струму перевищить значення уставки граничного елемента пускового органу 2, останній спрацює і впливає на виконавчий механізм 3. Виконавчий механізм, який як правило,

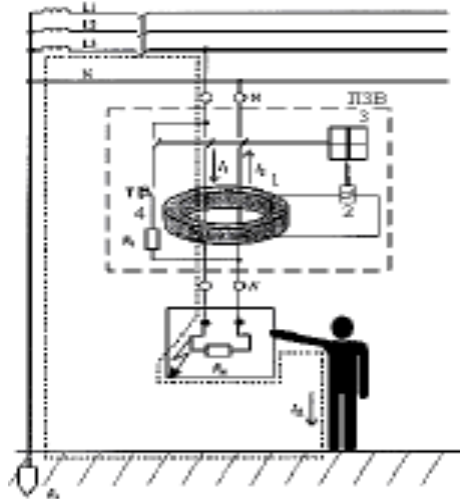


Рис. 7.4.1



Рис. 7.4.2

складається з пружинного приводу, спускового механізму і групи силових контактів, розмикає електричне коло і знеструмлює електроустановку. Зовнішній вигляд однофазного ПЗВ показаний на рис. 7.4.2.

Трифазні пристрої захисного відключення працюють приблизно за таким же принципом, як і однофазні. У трифазних ПЗВ через вікно сердечника проходять чотири дроти – три фазних і нульовий (нейтральний). Принципова електрична схема простого трифазного ПЗВ приведена на рис. 7.4.3.

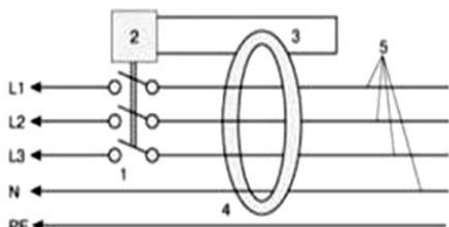


Рис. 7.4.3

Трифазне ПЗВ вмикає вимикач *1*, яким управляє елемент *2*, який отримує сигнал на відключення з вторинної обмотки *3* трансформатора струму *4*, крізь вікно якого проходять нейтральний провідник *N* і фазні

провідники *L1*, *L2* і *L3*. При однаковому навантаженні в нейтральному і фазному (або в трьох фазних) провідниках їх геометрична сума дорівнює нулю. Тому струму у вторинній обмотці трансформатора немає.

При витoku струму на заземлений корпус електроприймача, а також при випадковому дотику людини, що стоїть на землі або на струмопровідній підлозі до фазного або нейтрального провідника електричної мережі, рівність струмів в первинній обмотці трансформатора струму порушиться, оскільки по фазному провіднику, окрім струму навантаження, проходить струм витoku, і в його вторинній обмотці з'явиться струм – точно так, як і в описі роботи однофазного ПЗВ, що розглядався вище. Струм, що протікає у вторинній обмотці трансформатора, впливає на елемент, що управляє *2*, який через вимикач *1* відключає споживача від живлячої мережі. Зовнішній вигляд трифазного ПЗВ показаний на рис. 7.4.4.

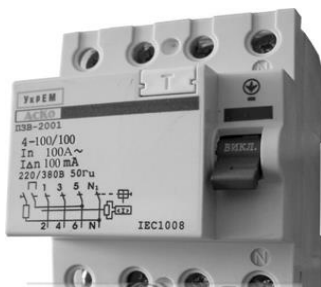


Рис. 7.4.4

7.4.3 Технічні параметри ПЗВ

Основними параметрами, за допомогою яких виконується вибір ПЗВ і контролюються їхні технічні характеристики, є наступні:

– номінальна напруга (U_n) – діюче значення напруги, при якому забезпечується працездатність ПЗВ. $U_n = 220, 380$ В.

– номінальний струм навантаження (I_n) – значення струму, що ПЗВ може пропускати в тривалому режимі роботи. $I_n = 6; 16; 25; 40; 63; 80; 100; 125$ А.

– номінальний диференціальний струм вимикання, ($I_{\Delta n}$) – значення диференціального струму, що викликає відключення ПЗВ при заданих умовах експлуатації. $I_{\Delta n} = 0,006; 0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 0,5$ А.

– номінальний диференціальний струм, що не вимикає, ($I_{\Delta n0}$) – значення диференціального струму, що не викликає відключення ПЗВ при заданих умовах експлуатації. $I_{\Delta n0} = 0,5 I_{\Delta n}$.

– граничне значення надструму, що не вимикає, (I_{nm}) – мінімальне значення надструму, що невідключає, при симетричному навантаженні дво- і чотириполюсних або при несиметричному навантаженні чотириполюсних ПЗВ. $I_{nm} = 6 I_n$.

– надструм – будь-який струм, що перевищує номінальний струм навантаження.

– номінальна здатність вмикати і вимикати (комутаційна здатність) (I_m) – діюче значення очікуваного струму, яке ПЗВ здатне включити, пропускати протягом свого часу розмикання і відключити при заданих умовах експлуатації без порушення його працездатності. Мінімальне значення $I_m = 10 I_n$ або 500 А (вибирається більше значення).

– номінальна здатність вмикати і вимикати по диференціальному струму ($I_{\Delta m}$) – діюче значення очікуваного диференціального струму, яке ПЗВ здатний включити, пропускати протягом всього часу розмикання і відключити при заданих умовах експлуатації без порушення його працездатності. Мінімальне значення $I_{\Delta m} = 10 I_n$ чи 500 А (вибирається більше значення).

– номінальний умовний струм короткого замикання (I_{nc}) – діюче значення очікуваного струму, яке здатний витримати ПЗВ, що захищається пристроєм захисту від коротких замикань, при заданих умовах експлуатації, без необоротних змін, що порушують його працездатність. $I_{nc} = 3000; 4500; 6000; 10\ 000$ А.

– номінальний умовний диференціальний струм короткого замикання ($I_{\Delta c}$);
– діюче значення очікуваного диференціального струму, яке здатний витримати ПЗВ, що захищається пристроєм захисту від коротких замикань при заданих умовах експлуатації без необоротних змін, що порушують його працездатність. $I_{\Delta c} = 3000; 4500; 6000; 10\ 000$ А;

– номінальний час відключення T_n – проміжок часу між моментом раптового виникнення диференціального струму, що відключає, і моментом гасіння дуги на всіх полюсах.

7.4.4 Встановлення ПЗВ

Основним нормативним документом, який необхідно використовувати при проектуванні електроустановок з використанням ПЗВ є ПБЕ. При цьому слід додатково розглянути такі питання:

- вибір категорії проектуваного об'єкта за умовами електробезпеки;
- вибір типу і параметрів ПЗВ;
- забезпечення селективності дії ПЗВ;
- вибір місця установки відповідно до призначення ПЗВ;
- провести аналіз роботи ПЗВ в електроустановках при використанні різних схем заземлення.

Вибір місця установки ПЗВ в групових колах електроустановок будинків рекомендується виконувати з урахуванням включення в зону дії ПЗВ насамперед ділянок електричного групового кола з найбільшою імовірністю електроураження людей при дотику до струмовідних або відкритих провідних частин електроустаткування, що можуть внаслідок ушкодження ізоляції опинитися під напругою. Це, насамперед, розеточні групи, ванні і душові кімнати, пральні машини, приміщення з підвищеною небезпекою ураження струмом і т.п. Установка ПЗВ, як правило, здійснюється у ввідно – розподільних пристроях (ВРП).

У багатоквартирних житлових будинках ПЗВ доцільно встановлювати в групових або квартирних щитках. Допускається установка в поверхових розподільних щитках. При виборі місця установки ПЗВ в будинку слід враховувати: спосіб монтажу електропроводки, матеріал будівель, призначення ПЗВ, умови експлуатації по електробезпеці, параметри ПЗВ, клас приміщень, схеми підключення електроприладів і т. п.

У схемах електропостачання радіального типу зі значною кількістю груп, що відходять, рекомендується установка загального на вводі й окремого ПЗВ на кожен групу приймачів за умови відповідного вибору параметрів ПЗВ, що забезпечують селективність їхньої дії.

Як відзначалося раніше у даний час використовуються системи заземлення електроустановок TN – C, TN – S, TN – C – S, TT, IT і застосування ПЗВ в кожній з цих систем має свої особливості.

На рис. 7.4.5 наведений приклад застосування ПЗВ в електроустановці із системою заземлення TN – S. Даний режим забезпечує безпечну експлуатацію електроустановок і надійне функціонування ПЗВ.

У системі TT усі відкриті провідні частини електроустановки приєднані до заземлення, електрично незалежного від заземлювача нейтралі джерела живлення. Приклад застосування ПЗВ в електроустановці системи TT показаний на рис. 7.4.6.

Для захисту від непрямого дотику в системі TT можливе використання пристрою захисту від надструму, якщо електроустановка має пристрій заземлювання, з дуже малим опором. При цьому гарантоване відключення живлення електроустановки повинне спрацьовувати при появі на відкритих провідних частинах електроустановки напруги не більш 50 В.

Для відключення живлення електроустановки системи TT за допомогою автоматичних вимикачів необхідно забезпечити високу кратність струму короткого замикання, низький опір пристрою заземлювання і т.д. У реальних

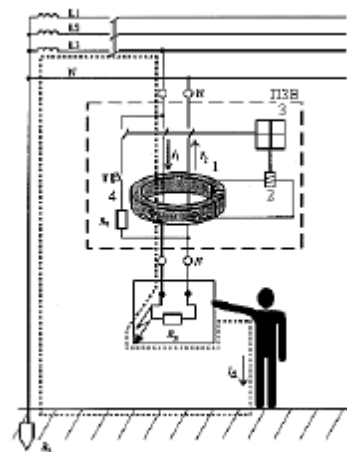


Рис. 7.4.5

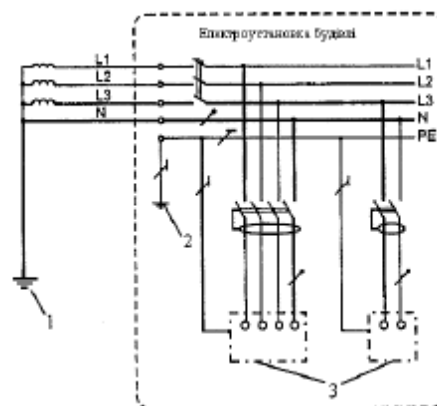


Рис. 7.4.6

умовах експлуатації виконати ці умови не завжди вдається. Ефективне рішення проблеми автоматичного відключення живлення дає застосування чутливих ПЗВ. При цьому уставка (номінальний диференціальний струм вимикання) повинна бути меншою значення струму замикання на заземлені відкриті провідні частини при напрузі на них 50 В щодо зони нульового потенціалу.

У системі ІТ значення струму замикання на землю визначається станом ізоляції мережі щодо землі. При високому опорі ізоляції щодо землі струм замикання на землю дуже малий. У випадку прямого дотику людини до струмовідних частин такої електроустановки струм, що протікає через тіло людини, при опорі ізоляції, вищому певного значення, не є небезпечним для життя. Таким чином, рівень опору ізоляції в мережах ІТ є фактором, що визначає як надійність, так і електробезпеку їхньої експлуатації. Оскільки в мережах ІТ дуже важливо підтримувати опір ізоляції на високому рівні, ведення автоматичного постійного контролю ізоляції є обов'язковим електрозахисним заходом.

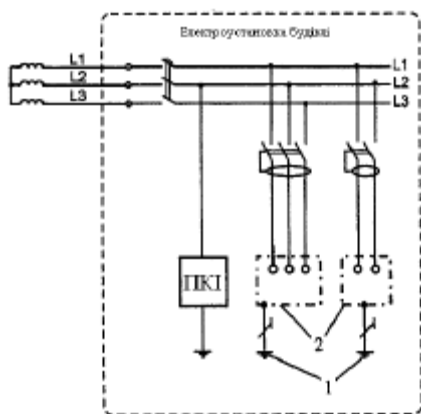


Рис. 7.4.7

Для захисту при непрямому дотику в мережах ІТ виконується захисне заземлення в сполученні з контролем ізоляції мережі або застосовуються ПЗВ з номінальним диференціальним струмом вимикання не більшим 30 мА. При першому замиканні на землю в електроустановках системи ІТ пристрій контролю ізоляції (ПКІ) подає сигнал. Якщо до усунення першого замикання відбувається друге замикання на землю, то спрацьовує ПЗВ. Схема підключення ПЗВ в системі ІТ наведена на рис. 7.4.7.

Велика частина електроустановок у нашій країні працює із системою заземлення TN – С (без захисного провідника РЕ). Схема включення ПЗВ в такий електроустановці наведена на рис. 7.4.8.

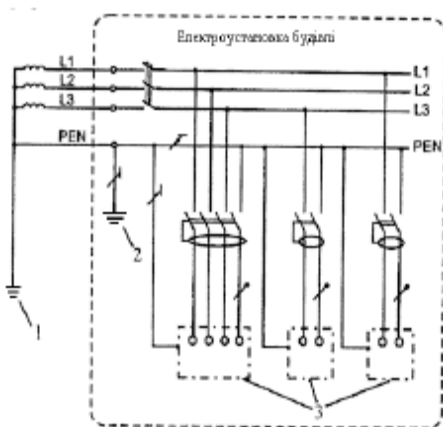


Рис. 7.4.8

пральні машини і т. д.

У такій електроустановці при пробі ізоляції на корпус електроприймача у випадку, якщо цей корпус не заземлений, ПЗВ, ввімкнений в коло живлення електроприймача, не спрацює, тому що немає кола протікання струму витоку – немає диференціального струму. Подібна ситуація виникає в житлових приміщеннях, у яких експлуатується побутова техніка, встановлена на ізолюючу основу, наприклад холодильники,

При цьому на корпусі електроприймача з'явиться небезпечний потенціал щодо землі. При дотику людини до корпусу електроприймача і протіканні через її тіло струму на землю, що перевищує номінальний диференціальний струм, ПЗВ зреагує і відключить електроустановку від мережі. У розглянутому випадку існує період часу, з моменту виникнення на корпусі електроприймача електричного потенціалу і до моменту відключення дефектного кола від мережі - це період потенційної небезпеки ураження людини. Однак застосування ПЗВ в електроустановках із системою заземлення TN – С також виправдане, оскільки цей пристрій забезпечує ефективний захист від ураження електричним струмом.

Для одержання системи TN–С–S у системі TN–С об'єднаний нейтральний і захисний провідник PEN розділяється на захисний PE і нейтральний N провідники у відносно-розподільному пристрої. При цьому нейтральний і захисний провідники не допускається підключати під спільний контактний затиск - із метою збереження з'єднання захисного провідника з

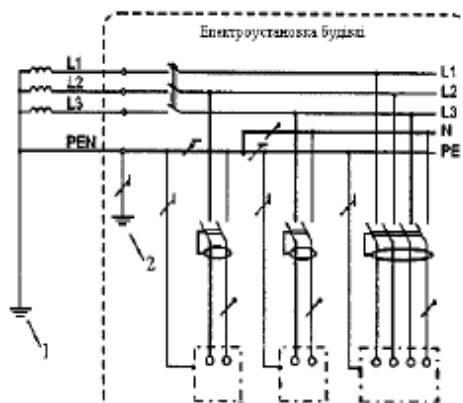


Рис. 7.4.9

заземленням у випадку руйнування контактного затиску. Застосування ПЗВ в електроустановці будинку системи TN – С – S наведено на рис. 7.4.9.

Рекомендується використовувати ПЗВ в тих частинах електроустановки будинку, де електричні кола з PEN-провідниками розташовані до вхідних клем ПЗВ. У разі потреби застосування ПЗВ для захисту окремих електроприймачів, що одержують живлення від системи TN – С, захисний PE – провідник електроприймача повинний бути підключений до PEN – провідника кола, що живить електроприймач, до захисного комутаційного апарата.

7.4.5 Вибір ПЗВ

Наразі різними виробниками випускається велика кількість різноманітних ПЗВ. Внаслідок цього при проектуванні, а також у процесі експлуатації виникають проблеми, пов'язані з вибором того чи іншого типу ПЗВ для конкретної електроустановки. При виборі ПЗВ доводиться користуватися тільки тією інформацією, що надається виробником. У зв'язку з цим особливу увагу, слід звертати на характеристики, що визначають якість цих пристроїв і їхню працездатність. Набір робочих характеристик – номінальна напруга, номінальний струм навантаження, номінальний диференціальний струм вимикання, як правило, приводяться в документації на ПЗВ. Їх вибирають відповідно до параметрів електроустановки, що проектується.

ПЗВ випускають у двополюсному і чотириполюсному виконанні. Двополюсні ПЗВ розраховані на номінальну напругу $U_n = 220\text{В}$,

чотириполюсні – на $U_n = 380$ В. Можливе застосування чотириполюсних ПЗВ в однофазній мережі – за умови, що при цьому забезпечується нормальне функціонування тестового кола при цій напрузі. Відповідно до нормативних документів ПЗВ повинен зберігати працездатність у визначеному діапазоні напруг. Слід зазначити, що електромеханічні ПЗВ є функціонально незалежними від напруги живлення і зберігають працездатність при будь-яких значеннях напруги.

Номинальний струм навантаження I_n вибирається з ряду: 6, 10, 16, 25, 40, 63, 80, 100, 125 А. Значення цього струму залежить, як правило, від перерізу провідників у самому пристрої і конструкції силових контактів. У зв'язку з тим, що ПЗВ захищений послідовним захисним пристроєм (ПЗП), номінальний струм навантаження ПЗВ повинний бути скоординований з номінальним струмом ПЗП. Величина номінального струму навантаження ПЗВ повинна дорівнювати або бути на ступінь вище номінального струму послідовного захисного пристрою. Якщо номінальні струми ПЗВ й автоматичного вимикача дорівнюють один одному, то при протіканні струму, котрий перевищує номінальний, ПЗВ буде перевантаженим весь проміжок часу до того моменту, коли відключиться автоматичний вимикач.

Номинальний диференціальний струм вимикання, – струм уставки вибирається з наступного ряду: 6, 10, 30, 100, 300, 500 мА.

Для кожного конкретного випадку уставку ПЗВ вибирають з урахуванням наступних факторів:

- значення існуючого в даній електроустановці сумарного (з урахуванням приєднаних стаціонарних і переносних електроприймачів) струму витоку на землю – так званого «фоновому струму витоку»;

- значення припустимого струму через людину на основі критеріїв електробезпеки;

- реального значення диференціального струму, що відключає ПЗВ.

Відповідно до вимог ПБЕ номінальний диференціальний струм вимикання ПЗВ повинний бути мінімум у три рази більшим сумарного струму витоку кола захищеної електроустановки. Величина сумарного струму витоку визначається розрахунковим шляхом чи вимірюється спеціальними приладами. При відсутності даних про значення струму витоку в електроустановці ПБЕ рекомендують приймати струм витоку електроприймача з розрахунку 0.4 мА на 1 А струму навантаження, а струм витоку кола – з розрахунку 10 мкА на 1 м довжини фазного провідника.

У деяких випадках для окремих споживачів значення уставки задається нормативними документами.

Номинальний диференціальний струм вимикання ПЗВ дорівнює половині значення струму уставки: $I_{n0} = 0.5 I_{\Delta n}$. Це означає, що реальне значення диференціального струму, при якому ПЗВ спрацьовує, знаходиться в діапазоні від половини до цілого значення номінального струму вимикання. Щоб уникнути помилкових відключень, дану обставину слід враховувати при проектуванні й експлуатації ПЗВ. Для надійної роботи ПЗВ необхідно

зіставляти реальне значення струму вимикання з «фоновим» струмом витоку в електроустановці.

Граничне значення надструму I_{nm} , який не відключає, характеризує здатність ПЗВ не реагувати на симетричні струми короткого замикання і перевантаження. Відповідно до нормативних документів мінімальне значення струму, що невідключає, повинне дорівнювати шестиразовому значенню номінального струму навантаження: $I_{nm} = 6 I_n$. Максимальне значення надструму, що не вимикається, не нормується і може мати значення, яке набагато перевищує $6 I_n$. Даний параметр є важливим показником якості пристрою. Помилковою є думка, що це струм, при якому ПЗВ повинний вимикати установку.

Номінальна здатність вмикати і вимикати (комутаційна здатність) є параметром, що визначає надійність ПЗВ. Залежить вона в основному від рівня технічного виконання пристрою – якості силових контактів, потужності пружинного приводу, матеріалу і якості механізму, наявності дугогасильної камери й ін.

Аналогічною є характеристика номінальної здатності по диференціальному струму $I_{\Delta m}$, що припускає протікання диференціального надструму, наприклад, при короткому замиканні на корпус електроприймача в системі TN–C–S.

Номінальний умовний струм короткого замикання I_{nc} – один з основних параметрів ПЗВ, що характеризує термічну й електродинамічну стійкість виробу при протіканні надструмів. Значення цього параметра вказується на лицьовій панелі пристрою або приводиться в технічній документації на ПЗВ.

Однак такі параметри як комутаційна здатність I_m і умовний розрахунковий струм короткого замикання I_{nc} , що визначають надійність роботи ПЗВ, не завжди приводяться виробниками в технічній документації.

Комутаційна здатність ПЗВ, відповідно до вимог норм, повинна бути не меншою десятикратного значення номінального струму або 500 А (береться більше значення).

Багато ПЗВ мають, як правило, набагато більш високу комутаційну здатність – 1000, 1500 А. Це значить, що такі пристрої надійніші, і в аварійних режимах, наприклад, при короткому замиканні на землю – ПЗВ, випереджаючи автоматичний вимикач, гарантовано вимкне установку.

Умовний розрахунковий струм короткого замикання – характеристика, що умовно визначає надійність і міцність пристрою, якість виконання його механізму й електричних з'єднань. Відповідно до нормативних документів мінімально припустиме значення I_{nc} , складає 4.5 кА. Чим вища якість ПЗВ, тим більше значення I_{nc} . У деяких зразках ПЗВ цей показник досягає значення 15 кА. На лицьовій панелі пристроїв даний показник вказується або символом (наприклад, $I_{nc} = 6000$, $I_{nc} = 10000$), або відповідними цифрами в прямокутнику.

Номінальний час вимикання T_n відповідно до вимог нормативних документів не повинний перевищувати 0.3 с. Однак у даний час розроблені

конструкції ПЗВ, у яких цей параметр складає 20–30мс. У зв'язку з цим у процесі експлуатації можливі ситуації, коли ПЗВ відключає струм навантаження чи надструм швидше апарата захисту.

Діапазон робочих температур ПЗВ – від мінус 5 до плюс 40⁰С.

Контрольні питання

1. Перелічить основні та додаткові ізолюючі захисні засоби, які застосовуються в електроустановках напругою до 1000 В.
2. Перелічить основні та додаткові ізолюючі захисні засоби, які застосовуються в електроустановках напругою вище 1000 В.
3. Поясніть призначення та принцип дії захисного заземлення.
4. Поясніть призначення, принцип дії та занулення.
5. Назвіть типи систем заземлення трифазних електричних мереж змінного струму напругою до 1000 В у відповідності до вимог МЕК.
6. Прокоментуйте систему заземлення TN.
7. Прокоментуйте систему заземлення TT.
8. Прокоментуйте систему заземлення IT.
9. Поясніть призначення захисного відключення.
10. Поясніть принцип дії ПЗВ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коруд В.І., Гамола О.Є., Малинівський С.М. Електротехніка: Підручник / За заг.ред. В.І. Коруда. – 3-тє вид. переробл. і доп. – Львів: Магнолія плюс; видавець СПД ФО В.М. Піча, 2005.– 447 с.
2. Хливнюк М.Г. Теорія електричних та магнітних кіл. Навчальний посібник, - ЖВІНАУ, 2010. – 220 с.
3. Хливнюк М.Г. Панчук О.О. Основи теорії кіл та сигналів. Частина 1. Основи теорії аналізу лінійних електричних кіл в усталених режимах роботи. Навчальний посібник. - ЖВІРЕ, 2007. – 212 с.
4. Хливнюк М.Г. Основи теорії кіл. Частина 2. Методи розрахунку електричних кіл у перехідних режимах. Навчальний посібник, - ЖВІНАУ, 2011. – 224 с.
5. Теоретичні основи електротехніки. Методичні рекомендації для самостійної роботи /Розроб. Денисюк А.Ю., Федяєв О.Л., Паламарчук А.С.- Житомир. ЖВІ, 2020. – 76с.
6. Федяєв О.Л., Черкес О.П. Електричні машини: Навчальний посібник. – Житомир: ЖВІ НАУ, 2010.– 284с.
7. Петрук М.Д., Федяєв О.Л., Ступак Д.Є. Електричні системи і мережі: Конспект лекцій. – Житомир: ЖВІРЕ, 2007. – 308 с.
8. Петрук М.Д., Черкес О.М., Ступак Д.Є. Релейний захист та автоматика: Навчальний посібник. – Житомир: ЖВІ НАУ, 2008.– 316с.
9. Петрук М.Д., Черкес О.М., Ступак Д.Є. Основи електропривода: Навчальний посібник. – Житомир: ЖВІРЕ, 2006.– 228с.
10. Толкачов І.М., Ступак Д.Є. Електробезпека: Конспект лекцій. – Житомир: ЖВІРЕ, 2005.– 248с.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

активні елементи, 11

В

вектор, 20

векторна діаграма, 33

Г

гармонійне коливання, 17

генератори, 64

глухозаземлена нейтраль, 182

Д

дисипативні елементи, 10

діюче значення, 19

двофазна система, 32

діаметр якоря, 56

додаткові полюси, 64

Е

електрична напруга, 9

електричне коло, 9

електрорушійна сила, 54

Є

ємнісний елемент, 24

З

закон Ома, 13

закон Кірхгофа, 14

закон магнітних кіл, 41

зазор, 58

збудження, 64

І

ідеальне джерело напруг, 11

ідеальне джерело струму, 11

індуктивний елемент, 26

ізольована нейтраль, 184

К

коливання частоти, 18

контур, 42

колектор, 48

компенсаційні обмотки, 64

М

метод комплексних величин, 23

магнітні кола, 38

магнітна індукція, 39

магнітна система, 56

мережа, 184

Н

напруженість, 40

намагнічувальна сила, 56

навантаження, 61

О

опір, 21

обернена задача, 45

обмоткотримач, 51

П

потенціал, 9

пасивні елементи, 10

послідовне з'єднання, 12

паралельне з'єднання, 12

провідність, 16

потужність, 37

пряма задача, 45

Р

радіокомпоненти, 9

реактивні елементи, 10

резистивні елементи, 15

реакція якоря, 60

резистор, 55

С

синусоїдна напруга, 23

станина, 48

Т

трифазні кола, 31

Ф

фаза, 21

Я

якір, 50