

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**



О. І. Рогачов, В. М. Гаряжа

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

З КУРСУ

«ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ»

(для студентів 1 курсу денної та заочної форм навчання
за напрямом 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»
спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»)

Харків

ХНАМГ

2011

Рогачов О. І. Конспект лекцій з курсу «Вступ до спеціальності» (для студентів 1 курсу денної та заочної форм навчання за напрямом 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання») / О. І. Рогачов, В. М. Гаряжа; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 98 с.

Автори: д.т.н., проф. О. І. Рогачов,
доц. В. М. Гаряжа

Рецензент: д.т.н., проф. В. Ф. Рой

Рекомендовано кафедрою електропостачання міст,
протокол № 1 від «8» вересня 2011 р.

ЛЕКЦІЯ 1

ВСТУП

Розвиток суспільства, його успіхи на шляху цивілізації безпосередньо пов'язані з підвищенням продуктивності праці та поліпшенням матеріальних умов життя людей. Необхідною умовою науково-технічного і соціального прогресу є збільшення споживання енергії та освоєння нових, більш ефективних її видів. Бурхливий прогрес техніки і той рівень, якого вона досягла сьогодні, був би неможливим без використання якісно нових видів енергії, в першу чергу електричної. *Електричну енергію по праву слід вважати основою сучасної цивілізації.* Без цієї енергії не можна уявити розвиток виробництва, електроніки, радіотехніки, обчислювальної техніки, сучасних технологій зв'язку. Для електричної енергії характерна висока зручність у користуванні та екологічна чистота. У той же час останні роки все більше показують взаємозв'язок енергетики й навколишнього середовища. Це відбувається тому, що потужності енергетики, яку людство навчилося добувати штучним шляхом, стали співрозмірними з потужностями природи. Штучні енергетичні процеси впливають на біосферу, як правило, негативно. Велику тривогу викликають забруднення атмосфери, зміна її газового складу, затоплення великих ділянок землі при спорудженні гідроелектростанцій, можливість радіоактивного забруднення, зміна теплового балансу планети. Курс «Вступ до спеціальності» в загальному вигляді об'єднує такі курси, як «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні матеріали», «Електричні машини», «Електричні апарати», «Електропривод» та ряд інших.

1. ВИРОБНИЦТВО, РОЗПОДІЛ І СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

1.1. ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Практичне використання електричної енергії почалося наприкінці 19 сторіччя. Сьогодні електроенергія так глибоко увійшла в промисловість і побут

людей, що життя без неї просто немислиме. Це результат тих переваг, які електроенергія має в порівнянні з іншими видами енергії.

Перелічимо найбільш важливі з них:

- **електроенергію легко одержати з інших видів енергії і перетворити з високим ККД в інші види енергії;**
- **місця одержання і споживання електроенергії можуть бути віддалені одне від одного. Це дозволяє споруджувати електричні станції поблизу енергетичних джерел та концентрувати великі виробничі потужності вдалині від них;**
- **легко і з невеликими втратами електроенергію можна передавати на великі відстані, причому ця передача відбувається практично миттєво;**
- **застосування електроенергії поліпшує і полегшує умови праці, дозволяє автоматизувати виробничі процеси;**
- **з використанням електроенергії поліпшуються побутові умови населення, тому що вона екологічно чиста, гігієнічна і зручна.**

Виробництво, передача, розподіл і споживання електричної енергії – єдиний процес.

Виробництво електричної енергії, її передача споживачам і споживання відбуваються одночасно. Власне, електроенергію досить складно запасати і зберігати на складі. Її необхідно виробити в той момент і в такій кількості, як потрібно споживачеві. Тому виробництво електроенергії має зростати або зменшуватися пропорційно її споживанню. Для збереження електричної енергії необхідні спеціальні методи її перетворення в інші види енергії (наприклад, у хімічну в акумуляторі). Останнім часом створені напівпровідникові індуктивні та ємнісні накопичувачі електроенергії, але вони ще не набули розповсюдження.

Енергетичні ресурси. Електричну енергію одержують на електричних станціях шляхом перетворення з іншого виду енергії. Як *енергетичні ресурси* використовують переважно енергію води, що рухається, хімічну енергію палива (твердого, рідкого і газоподібного) і атомну енергію. Експлуатація таких тради-

ційних джерел енергії породжує *екологічні проблеми*, при цьому слід пам'ятати, що запаси викопних палив обмежені.

Останнім часом посилився інтерес до так званих *нетрадиційних джерел енергії*: сонця, вітру, припливів і відпливів океанської води, геотермальних джерел, біомаси та ін. Як енергетичні ресурси вони давно відомі. Новою є технологія їхнього використання. Нетрадиційні джерела енергії практично невичерпні й екологічно чисті. Однак існують труднощі перетворення їхньої енергії в електричну. На сьогодні слід зазначити низький ККД таких споруд для перетворення енергії і, як наслідок, дорожнечу одержуваної електроенергії. Тому частка нетрадиційних джерел електроенергії в загальному балансі світової електроенергії незначна.

Найбільш перспективним *новим джерелом енергії* вважають *термоядерний синтез* – використання теплової енергії, що виділяється при з'єднанні (синтезі) ядер деяких легких елементів. Як термоядерне паливо можна використовувати ізотопи водню: дейтерій і тритій, запаси яких на земній кулі практично невичерпні. На сучасному етапі головні труднощі в здійсненні термоядерного синтезу – це реалізація керованої термоядерної реакції. У цьому напрямку ведеться велика дослідницька робота. Незважаючи на великі труднощі, кінцеві результати обнадійливі: очікується, що перші термоядерні електростанції будуть створені на початку цього сторіччя.

Електроенергетична система. Перші електричні станції мали невелику потужність і забезпечували споживачів, що знаходились від них у безпосередній близькості. Досвід показав, що такий спосіб електропостачання економічно не вигідний і технічно недоцільний, особливо зі збільшенням числа і потужності споживачів. Це змусило споруджувати більш потужні електростанції і більш протяжні *мережі електропередачі*.

Треба було зв'язувати паралельно роботу двох і більше електростанцій. Нарешті, прийшли до створення *електроенергетичних систем*.

***Електроенергетичні системи* (енергетичні системи) – це сукупність споруд для виробництва, перетворення, передачі, розподілу і споживання електричної енергії, що зв'язані загальним технологічним процесом і загальним централізованим керуванням.**

На рис. 1.1, а приведений спрощений вид енергетичної системи (ЕС), а на рис. 1.1, б – її електрична схема.

У країнах з невеликою територією створюють одну ЕС, а у великих країнах може бути й більше. Окремі енергосистеми в одній або декількох країнах поєднують між собою лініями електропередач і створюють *об'єднані енергосистеми* (ОЕС) для обміну електроенергією. В Україні утворена *єдина енергетична система України, яка з'єднана з енергосистемою Росії*.

Структура потужностей енергетики України на сьогодні приблизно така:

- теплові електростанції – 67%;
- атомні електростанції – 24%;
- гідроелектростанції – 9%.

Сумарна потужність електростанцій складає близько 54 ГВт. Виробництво електроенергії за видами енергоносіїв не зовсім відповідає структурі встановлених потужностей: ядерне паливо дає 43; вугілля – 27; газ – 22; гідроенергія – 5; нафта – 3% від загальної кількості електроенергії.

Більше 40% електростанцій на сьогодні відпрацювали свій ресурс – необхідна їх модернізація. Устаткування більшості теплових електростанцій не відповідає сучасним технічним і екологічним вимогам. Існують проблеми в мережному господарстві – потужності Рівненської і Хмельницької АЕС неможливо передати на схід країни, де знаходяться основні споживачі. Магістральна мережа 750 кВ, яка б могла це забезпечити, складається з двох одноланцюгових петель. Одна з них розташована в західній частині країни і включає в себе Хмельницьку атомну, Чорнобильську атомну електростанції, Вінницьку і Західноукраїнську підстанції. Друга розташована на сході країни і включає Запорізьку АЕС, Дніпровську і Запорізьку підстанції. Ці дві петлі з'єднані між собою одно-

ланцюговою ЛЕП 750 кВ між Вінницькою і Дніпровською підстанціями, що проходить через Південноукраїнську АЕС.

Магістральні ЛЕП 330 кВ створюють своєрідні решітки навколо кожної підстанції 750 кВ, яка живить розподільні системи, і доповнюють з'єднання між підстанціями 750 кВ. Магістральні мережі 220 кВ доповнюють системи 330 кВ. Магістральна мережа 400 кВ знаходиться в західній частині країни й експортує електроенергію, яку виробляє Бурштинська ТЕС, в Угорщину і Словаччину. Магістральна мережа 500 кВ знаходиться в східній частині країни і з'єднує Донбаську підстанцію з Нововоронезькою АЕС і Шахтинською підстанцією, розташованою в Північно–Кавказькій енергосистемі Росії.

Усі ЛЕП 750 кВ в Україні є одноланцюговими. При цьому пропускна здатність на один ланцюг складає більше 2 000 МВт. Шість з одинадцяти підстанцій 750 кВ працюють тільки з одним головним трансформатором масляного типу потужністю 1 000 МВт або 1250 МВт. Магістральна мережа 750 кВ формувалася з початку 70-х до 1990 року. На сьогодні близько третини ЛЕП 750 кВ вичерпали свій термін служби.

Магістральні мережі 330, 400, і 500 кВ в основному були побудовані в 60 – 70-ті роки минулого століття, і 60% їх вже відслужили свій ресурс. Всього в експлуатації перебувають близько 1 млн. км ліній усіх класів напруги.

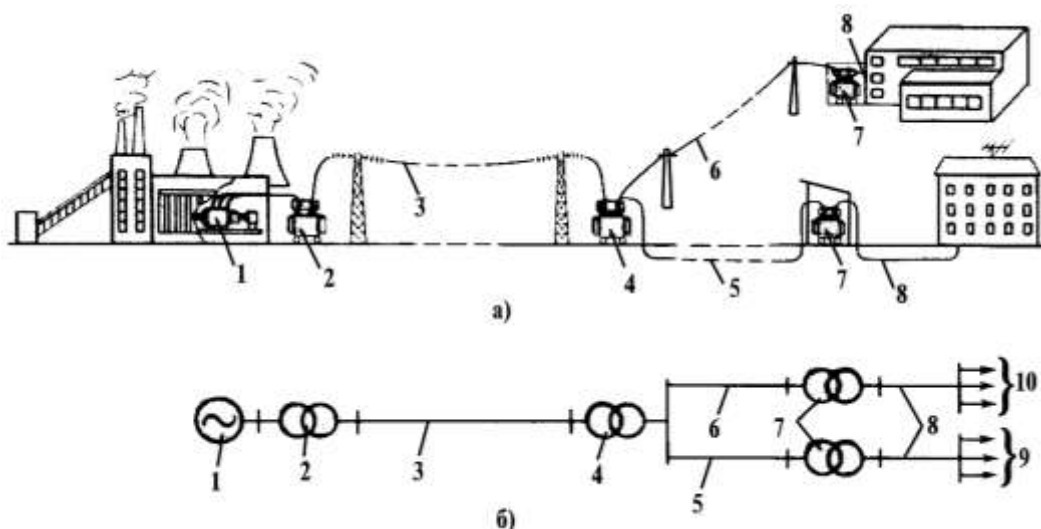


Рис. 1.1– Електроенергетична система (а) та її зображення (б) за допомогою умовних позначень:

1 – генератор електроенергії; 2 – підвищувальний трансформатор; 3 – лінія електропередачі високої напруги; 4, 7 – понижувальні трансформатори; 5, 6 – лінії середньої напруги; 8 – лінії низької напруги; 9, 10 – споживачі

В електричних установках ЕС використовують різні значення напруги. Для зменшення втрат при перетворенні і для забезпечення оптимальної роботи електричних установок ці напруги стандартизовані.

На змінному струмі:

- однофазні до 1000 В: 6, 12, 24, 36, 42, 220, 380 В;*
- трифазні до 1000 В: 42, 380, 660 В;*
- трифазні понад 1000 В: 3, 6, 10, (20), 35, 110, (150), 220, 330, (400), (500), 750 кВ.*

На постійному струмі: 6, 12, 24, 48, 60, 110, 220 В, 800 кВ.

Напруги, вказані в дужках, в Україні мають обмежене застосування.

У деяких країнах поширені напруги, що відрізняються від наведених вище. Використовують і нестандартні напруги, головним чином в електричному транспорті (постійна напруга 550 і 1500 В і однофазна змінна напруга 25 кВ).

Напругу для електричної установки вибирають, виходячи з мінімуму капітальних, експлуатаційних витрат, втрат електроенергії і вимог безпеки.

Електричні станції. Класичним є метод одержання електричної енергії на електростанціях за допомогою *генератора з ротором, що крутиться*, який приводиться в обертання від джерела механічної енергії. Використовують *трифазні синхронні електрогенератори* через переваги трифазного струму і можливості створювати такі генератори на великі потужності.

Залежно від виду використовуваних енергетичних ресурсів електростанції бувають гідравлічні, теплові, атомні, сонячні, вітряні, приливні та ін.

Гідравлічні електричні станції (ГЕС). Для одержання електричної енергії використовують енергію води, що рухається. Залежно від джерела використовуваних вод розрізняють ГЕС *на проточній воді і з греблями*.

На рис. 1.2 наведений поперечний розріз ГЕС із греблею. При відкритому шибері 2 вода з водоймища 1 надходить по напірному водоводу 3 до спіральної камери 9, де її направляють до лопаток водяної (гідравлічної) турбіни 10. Турбіна приводить в обертання ротор генератора 6, що виробляє електричну енергію. Після підвищення напруги трансформатором 5 за допомогою лінії передачі 4 електроенергія подається до споживачів.

Особливим видом ГЕС є *насосно-акумулюючі гідравлічні (гідроакумулюючі) електростанції (ГАЕС)*. Їх розташовують між нижньою і верхньою водоймами 1, 7. При великому споживанні електроенергії в енергосистемі ГАЕС працюють у *генераторному режимі*: вода з верхньої водойми скидається до гідротурбін, що виробляють електроенергію, і надходить у нижню водойму. Уночі (при мінімальному споживанні електроенергії) воду насосами (агрегати ГАЕС оборотні) перекачують з нижньої водойми у верхню.

Теплові електричні станції (ТЕС). Хімічну енергію горіння палива перетворюють в електричну на ТЕС. Розрізняють *конденсаційні (КЕС)*, що виробляють тільки електричну енергію, і *теплофікаційні (теплоелектроцентралі) електростанції (ТЕЦ)*. На ТЕЦ виробляється електрична і теплова енергія.

На рис. 1.3 показана технологічна схема КЕС, що працює на твердому паливі. Вугілля транспортером 1 подають у бункер 2. Розмелене млином 3 до пилоподібного стану вугілля вентилятором 4 і разом з необхідним для згоряння попередньо підігрітим у повітрянагрівачі 12 повітрям подається через пальники 5 у топкову камеру 6 парового котла 7. Теплота, що виділилася при згорянні

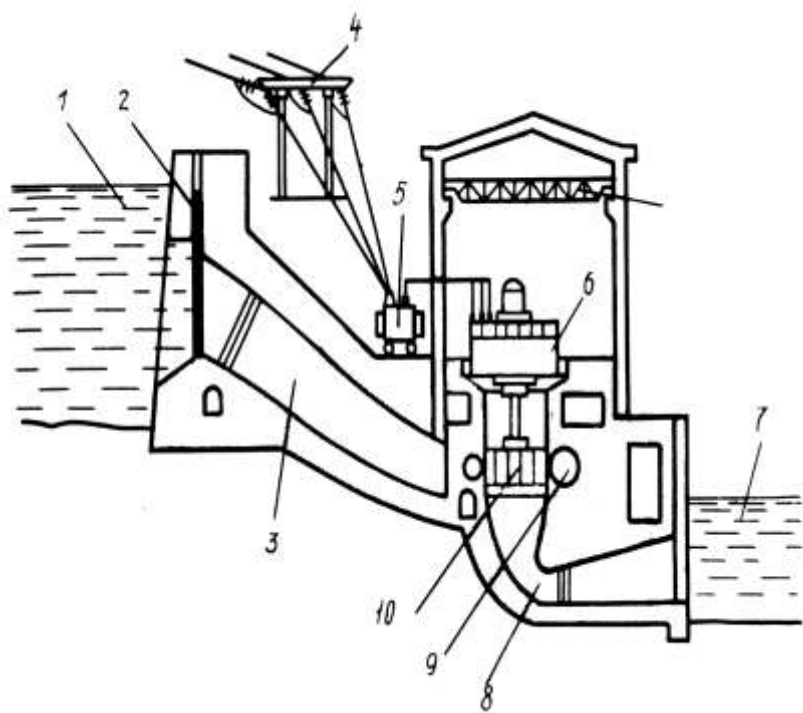


Рис. 1.2—Будова ГЕС:

1 – водойма; 2 – жалюзі греблі; 3 – напірний трубопровід; 4 – лінія електропередачі; 5 – підвищувальний трансформатор; 6 – електричний генератор; 7 – нижня водойма; 8 – нижній трубопровід; 9 – спіральна камера; 10 – гідравлічна турбіна; 11 – паровий котел; 12 – повітрянагрівач; 13 – пальники; 14 – топкова камера; 15 – парова турбіна; 16 – паропідігрівач; 17 – барабан; 18 – насос; 19 – конденсатор.

Вироблену електрогенератором 16 електричну енергію після підвищення її напруги в трансформаторі 23 подають до ліній електропередачі 24. Збуджувач 17 призначений для створення струму збудження в генераторі 16.

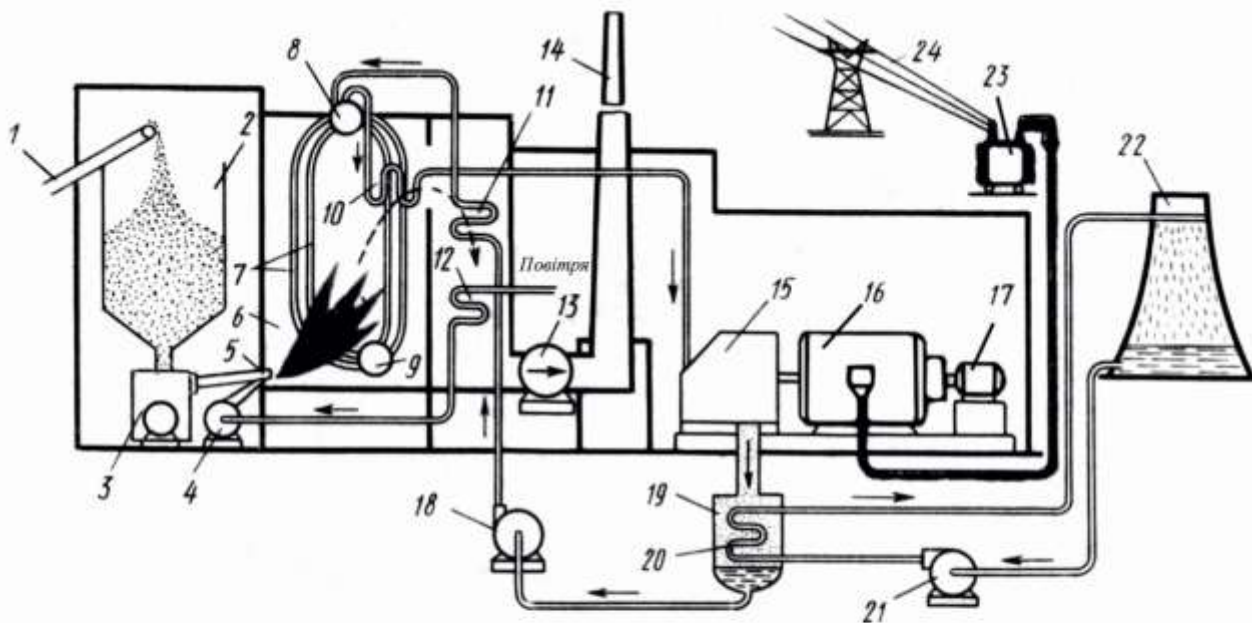


Рис. 1.3—Спрощена технологічна схема КЕС:

1 – транспортер вугілля; 2 – бункер вугілля; 3 – млин для розмелювання вугілля; 4 – вентилятор; 5 – пилувугільна горілка; 6 – топка; 7 – паровий котел; 8, 9 – барабани нижньої системи циркуляції води і пари; 10 – пароперегрівач; 11 – водонагрівач (економізатор) котла; 12 – підігрівач повітря; 13 – газовий вентилятор (димосос); 14 – димова труба; 15 – парова турбіна; 16 – електрогенератор; 17 – збуджувач генератора; 18, 21 – водяні насоси; 19 – конденсатор; 20 – змійовик; 22 – водоохолоджувач (градирня); 23 – силовий трансформатор; 24 – лінія електропередачі

Атомні електричні станції (АЕС). У принципі це теплові електростанції, в яких *теплота виділяється за рахунок реакції розпаду радіоактивних елементів у ядерному реакторі.*

Виділення теплової енергії в сучасних реакторах відбувається при розщепленні ядер деяких важких елементів (ізотопи урану-235, урану-233, плутонію-239 та ін.) внаслідок впливу на них повільних нейтронів. Набуває поширення нове покоління ядерних реакторів *на швидких нейтронах*. Крім теплоти для виробництва електроенергії вони будуть відтворювати і ядерне паливо. У даний час такі реактори працюють у Росії, Франції та в інших країнах. Їхня робота багато в чому має експериментальний характер.

На рис. 1.4 наведена спрощена технологічна схема одержання пари на АЕС за *двоконтурним циклом*. *Перший контур*, що складається з ядерного реактора 2 з кришкою 3 і парогенератора 9 з його устаткуванням, радіоактивний і забезпе-

чується радіаційним захистом 1. Як теплоносій і одночасно сповільнювач нейтронів використовується звичайна вода (рідше – важка вода). Другий контур, до якого належать також парогенератор 9, парова турбіна 13 і їхнє устаткування, не

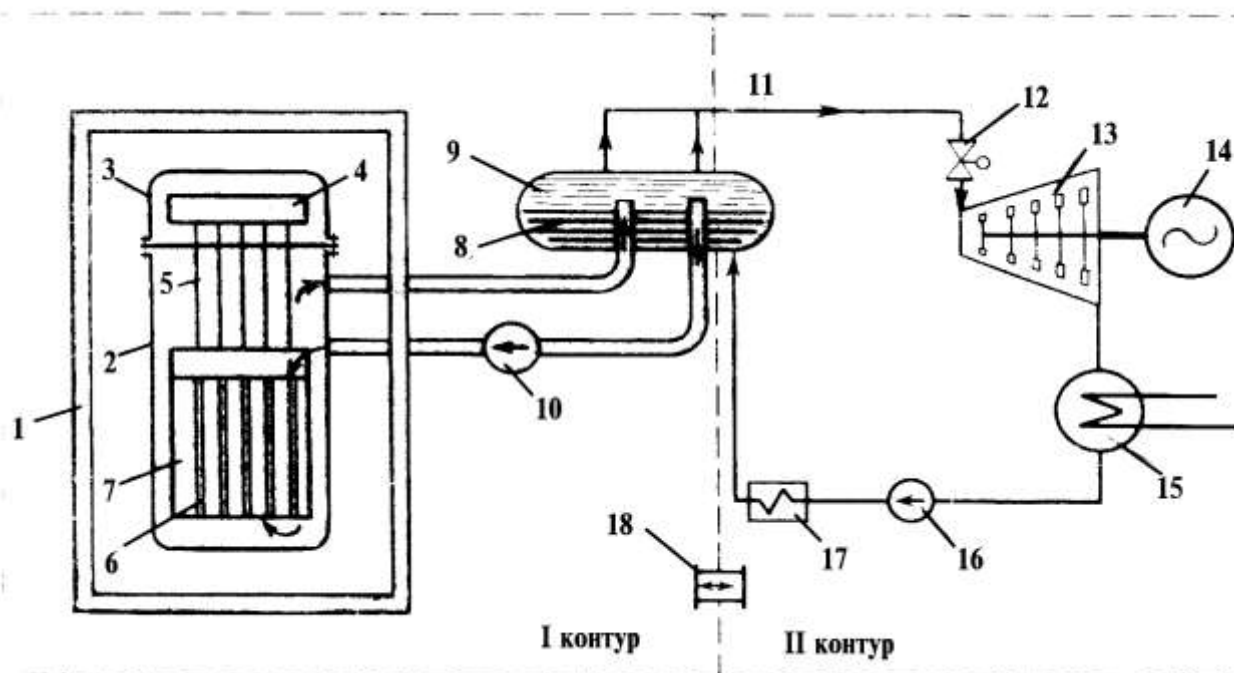


Рис. 1.4 – Спрощена технологічна схема АЕС:

1 – біологічний захист ядерної установки; 2 – ядерний реактор; 3 – кришка реактора; 4 – система керування і захисту реактора; 5 – стержні управління і захисту; 6 – паливні збірки (канали з ядерним збагаченим паливом); 7 – активна зона реактора; 8 – трубна система парогенератора; 9 – парогенератор; 10 – головний циркуляційний насос; 11 – паропровід; 12 – пристрій регулювання подачі пару; 13 – парова турбіна; 14 – електричний генератор; 15 – конденсатор; 16 – насос; 17 – підігрівач води; 18 – санітарний пропускник, який з’єднує перший (радіоактивний) і другий (безпечний) контури АЕС

радіоактивний. Теплоносій (робочим тілом) у ньому служать вода і водяна пара. Тепло, що виділяється в реакторі при ядерній реакції, нагріває теплоносій (воду в каналах паливних збірок 6). Нагріта до високої температури вода надходить по трубопроводу з реактора в U-подібні трубки 8 парогенератора 9. Тут вона нагріває і випаровує воду другого контура, перетворюючи її на пару. Охолоджена в парогенераторі радіоактивна вода за допомогою головного циркуляційного насоса 10 повертається в активну зону 7 реактора, де й розміщені паливні збірки. З парогенератора чиста нерадіоактивна пара по паропроводу 11 через клапани 12 надходить у турбіну 13, яка обертає електрогенератор 14 для виробництва електроенергії. Відпрацьована пара конденсується в конденсаторі 15 і насосом 16 через підігрівник 17 направляється назад у парогенератор 9. Пер-

ший і другий контури АЕС надійно відгороджені і з'єднуються один з одним через санітарний пропускник 18.

Ланцюговою ядерною реакцією в реакторі керують за допомогою керуючих стержнів 5 системи керування і захисту 4.

Експлуатація АЕС дозволяє заощаджувати значну кількість органічного палива, зменшувати забруднення атмосфери вуглекислим газом і оксидами азоту і сірки. Основні недоліки АЕС: *необхідність складного радіаційного захисту і наявність радіоактивних відходів.*

Внаслідок багаторазового перетворення енергії *ККД сучасних теплових електростанцій досить низький.* Це змушує шукати нові (*прямі*) методи одержання електричної енергії. Можна виділити три нових напрямки перетворення енергії: *термоємісійне, термоелектричне і магнітогідродинамічне.* При їхньому використанні відпадає необхідність в одержанні механічної енергії, що приводить до підвищення ККД перетворюючих пристроїв.

ЛЕКЦІЯ 2

2.1. ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ

Електричну енергію від джерел до споживачів передають за допомогою електричних мереж. До їхнього складу входять всі споруди з передачі, перетворення і розподілу електричної енергії: трансформаторні підстанції, відкриті й закриті розподільчі установки, лінії електропередачі.

Електричні мережі класифікують:

- *за видом струму – постійного і змінного струму;*
- *за значенням напруги – низької (до 1 кВ), середньої (від 1 до 35 кВ), високої (від 35 до 400 кВ) і надвисокої (понад 400 кВ) напруги;*
- *за призначенням – міжсистемні, магістральні і розподільні;*
- *за конструктивним виконанням – повітряні, кабельні, внутрішні.*

Для передачі й розподілу електричної енергії використовують переважно мережі змінного струму з частотою 50 Гц, а в деяких країнах Азії й Америки – 60 Гц.

Міжсистемні електричні мережі (лінії електропередачі – ЛЕП) служать для зв'язку між окремими електроенергетичними системами, магістральні мережі – для транспортування енергії від електростанцій до районних підстанцій, розподільні мережі – для розподілу електроенергії між споживачами.

Спорудження високовольтних електричних мереж дозволяє передавати електричну енергію на великі відстані при порівняно невеликих її втратах. Втрати потужності збільшуються пропорційно квадрату сили струму $\Delta P = I^2 R$. Передача великих потужностей при низькій напрузі струму технічно недоцільна і економічно не вигідна (треба збільшувати переріз проводів).

Приклад. Визначити втрати потужності в однофазній лінії електропередачі (фаза і нуль) довжиною $l = 150$ км і $\cos\phi = 1$ з перерізом проводів $S = 35$ мм², при передачі потужності $P = 100$ кВт з напругою 10 і 100 кВ, питомий опір алюмінієвих проводів $\rho = 0.028$ Ом мм²/м.

1. Визначимо опір проводів лінії електропередачі:

$$R = \rho \frac{2l}{S} = 0.028 \frac{2 \cdot 150000}{35} = 240 \text{ Ом.}$$

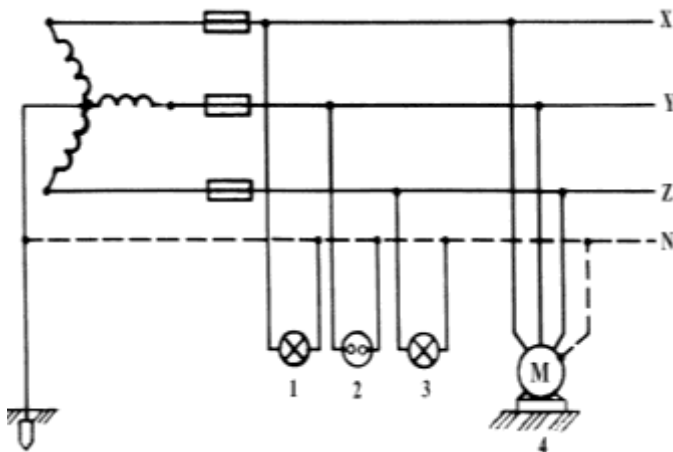


Рис. 2.1 – Схема з чотирма провідниками і з заземленою нейтраллю

2. Сила струму при напрузі 10 і 100 кВ відповідно:

$$I_{10} = \frac{P}{U} = \frac{100000}{10000} = 10 \text{ А;}$$

$$I_{100} = \frac{P}{U} = \frac{100000}{100000} = 1 \text{ А.}$$

3. Втрати потужності при передачі енергії залежно від напруги

$$\Delta P_{10} = I^2 R = 10^2 \cdot 240 = 24000 \text{ Вт} = 24 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_1 = I^2 R = 1^2 \cdot 240 = 240 \text{ Вт} = 0.24 \text{ кВт.}$$

З отриманих результатів видно, що передача потужності при напрузі 10 кВ приводить до великих втрат, які дорівнюють 1/4 переданої електричної енергії. При напрузі 100 кВ ці втрати незначні.

Електричні мережі для середньої, високої і надвисокої напруг виконують трифазними. Для мереж низької напруги прийнята схема з чотирма проводами і з заземленою нейтраллю (рис. 2.1).

Таким чином, є можливість одержувати дві напруги: фазну 220 В для освітлення і живлення однофазних споживачів (1–3) і лінійну (міжфазну) 380 В для силових споживачів (4). Крім того, наявність нульового провідника забезпечує електричну безпеку споживачів.

Повітряні лінії електропередачі. Такі лінії виконують з неізолюваних проводів, закріплених на опорах за допомогою ізоляторів. Упродовж лінії електропередачі ізолятором служить повітря. Проводи бувають *одножильними*, *багатожильними* і з *спеціальним профілем*. Найчастіше використовуються багатожильні провідники. Вони гнучкіші і мають більшу механічну міцність. Проводи спеціального профілю використовують при спорудженні контактних мереж електричного транспорту. Проводи для електропередачі можуть бути виготовлені з міді, алюмінію, сталі, а також із сталі й алюмінію. *Мідь* – дефіцитний матеріал, тому для проводів її використовують мало. Найчастіше застосовують багатожильні проводи зі *сталі й алюмінію*. Серцевина такого проводу сталева, а на неї навиті алюмінієві жили. За рахунок цього одержують добру електричну провідність (алюміній) і механічну міцність (сталь).

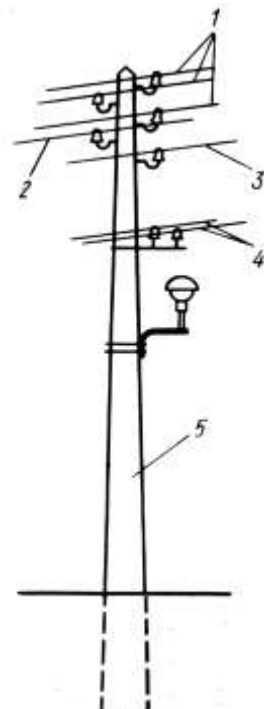


Рис. 2.2. - Розташування проводів повітряної мережі низької напруги

У лініях електропередачі з напругою понад 220 кВ застосовують пучки провідників: кожен фазний провідник складається з декількох паралельних багатожильних проводів, розташованих на певній відстані один від одного (40–60 см) і з'єднаних між собою спеціальними тримачами (*розпірками*).

Сталеві проводи використовують переважно для захисту від блискавок і монтують над фазними проводами в лініях електропередачі високої і надвисокої напруги.

У населених пунктах повітряні мережі низької напруги виконують з таким розташуванням проводів (рис. 2.2): зверху

встановлюють три фазних проводи 1, під ними нульовий провід 2, а знизу – провід 3 для вуличного освітлення. У багатьох випадках на тім же стовпі, але нижче, розташовують ще два проводи 4 для радіотрансляційної мережі.

Опори 5 (стовпи) залежно від матеріалу, з якого вони виготовлені, бувають дерев'яні, залізобетонні і металеві. Дерев'яні опори використовують рідко. Залізобетонні опори дешевші й служать довше. Їх застосовують для ліній електропередачі напругою до 330 кВ. Металеві опори роблять ґратчастими зі сталевих профілів. На них виконують лінії електропередачі для високих і надвисоких напруг.

Ізолятори виготовляють з порцеляни або скла. Залежно від конструктивного виконання вони бувають *штиревіми* і *підвісними*. Штиреві ізолятори використовують для напруг до 35 кВ включно. Для більш високої напруги застосовують підвісні ізолятори, з яких збирають *ізоляторні гірлянди*. Число ізоляторних елементів в одній гірлянді визначається напругою лінії електропередачі (наприклад, для напруги 110 кВ – 6–8 штук).

Кабельні лінії електропередачі. Лінії електропередачі можна виконувати шляхом укладання кабелів у землю. Конструкція використовуваних кабелів визначається напругою, числом і перерізом жил, умовами роботи. Струмопровідні жили виготовляють із міді або алюмінію. Кабелі бувають *одно-* і *багато-жилевими*. Залежно від числа жил розрізняють *одно-, дво-, три-* і *чотирижилеві* кабелі. Чотирижилеві кабелі використовують у мережах низької напруги,

причому одна з жил є нульовим проводом.

В останні роки проводять інтенсивні науководослідні роботи зі створення і впровадження *надпровідних* кабелів. Жили цих кабелів, охолоджені рідким гелієм, воднем та ін., знаходяться у стані надпровідності. Використовують також матеріали, що мають високотемпературну надпровідність.

Для кабельних ліній електропередачі не потрібні широкі траси, вони не піддаються впливові атмосферних явищ, зручні для міських умов та ін.

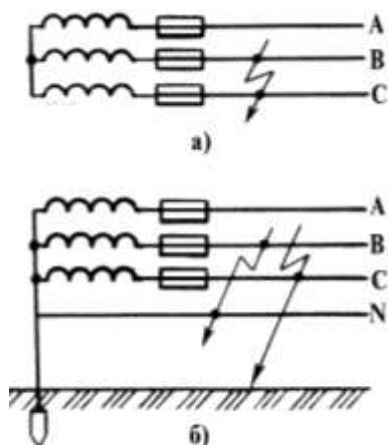


Рис. 2.3–Коротке замикання в електричних мережах з ізолюваною (а) і заземленою (б) нейтраллю

Однак вони капіталоемні, а місце їхнього ушкодження важче знайти.

Коротке замикання в електричних мережах. Кожне непередбачене металеве з'єднання міжфазними провідниками (рис. 2.3, *а*), а при з'єднанні в зірку із заземленою нейтраллю – міжфазним провідником і землею або міжфазним і нульовим провідниками (рис. 1.7, *б*) називають *коротким замиканням*. Причинами короткого замикання можуть бути порушена ізоляція, порвані провідники, неправильні дії персоналу та ін. Струм, що протікає в цьому випадку, багаторазово перевищує номінальний і приводить до перегрівів і механічних пошкоджень електричних споруд.

Для швидкого відключення лінії при замиканні і для запобігання ушкоджень електричних установок на початку кожної лінії обов'язково встановлюють захист від максимального струму за допомогою плавкого запобіжника, автоматичних вимикачів або реле максимального струму (залежно від конкретних вимог).

2.2. ПІДСТАНЦІЇ І РОЗПОДІЛЬНІ УСТАНОВКИ

Перетворення (трансформацію) електричної енергії з більш низької на більш високу напругу і навпаки, а також її розподіл здійснюють на підстанціях.

Види підстанцій. Залежно від призначення і місця в електроенергетичній системі підстанції бувають:

- *міжсистемні* – призначені для зв'язку між окремими ЕС. Через них передають і на них перетворюють великі потужності електроенергії надвисокої і високої напруги;
- *районні* – на них перетворюють надвисокі напруги у високі (або високі – в середні напруги) для живлення районних розподільних мереж;
- *місцеві* – для живлення міських районів, міст або сел. На них перетворюють високі або середні напруги в більш низькі (6, 10, 20 кВ);
- *трансформаторні* – для перетворення середніх напруг у більш низькі (380/220 В);

– *перетворювальні* – для перетворення змінного струму в постійний або з іншим значенням напруги (переважно для електричного транспорту). Їх споруджують і як кінцеві підстанції при переході до ліній електропередачі постійного струму.

За способом будівництва розрізняють *закриті й відкриті* підстанції. При напрузі до 35 кВ їх роблять закритими, при напрузі понад 35 кВ – найчастіше відкритими. Закриті підстанції дорожчі і споруджуються повільніше, але експлуатаційні умови в них кращі.

Основне обладнання. Основним обладнанням в підстанціях є *перетворювальні й розподільні пристрої*.

Перетворювальними пристроями є трансформатори, випрямлячі струму, інвертори (пристрої, що перетворюють постійний струм у змінний – процес, зворотний випрямленню струму) і перетворювачі частоти.

Розподільні установки – це сукупність обладнання, призначеного для прийому і розподілу електроенергії: шини, вимикачі, роз'єднувачі і т. д.

Для різних за значенням напруг споруджують окремі розподільні установки (рис. 2.4).

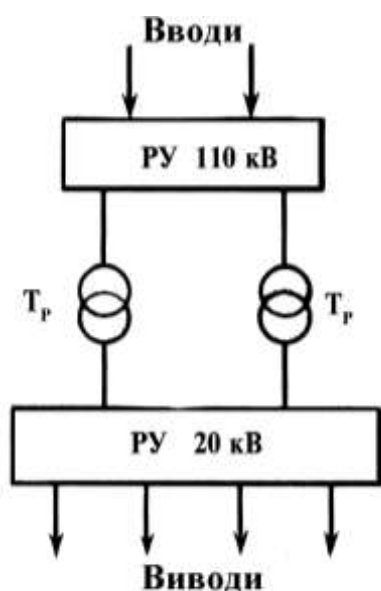


Рис. 2.4– Структурна схема розподільної установки

Кількість і потужність трансформаторів на підстанції залежать від електричних навантажень і вимог безпечної експлуатації. Часто підстанції споруджують з двома і більше трансформаторами, які можуть працювати *паралельно*.

Залежно від вимог щодо безперервності живлення усіх споживачів підрозділяють на три категорії: *першу, другу і третю*. Живлення електроенергією споживачів першої і другої категорій здійснюють від двох або більше незалежних джерел або окремих трансформаторів.

Невеликі трансформаторні підстанції для живлення споживачів третьої категорії виконують з одним трансформатором (рис. 2.5). Зі схеми видно послідов-

ність з'єднання електричних пристроїв. Живлення здійснюється повітряною лінією електропередачі через прохідний ізолятор *ПІ*.

Вентильні розрядники *ВР* служать для захисту обладнання трансформаторної підстанції від перенапруг.

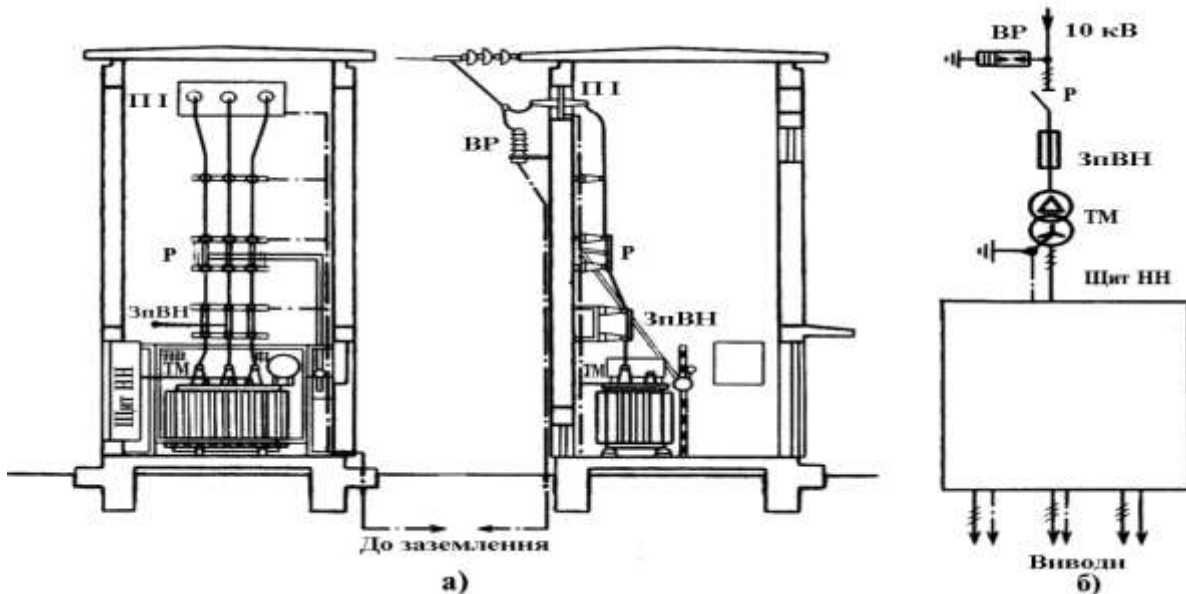


Рис. 2.5–Будова (а) і принципова схема (б) трансформаторної підстанції

Роз'єднувачем *P* трансформатор можна відключити з боку високої напруги. Захист від перевантажень і коротких замикань здійснюється за допомогою плавких запобіжників ЗпВН. У розподільчому щиті низької напруги змонтована комутаційна і вимірювальна апаратура. Від щита відводять виводи для живлення споживачів.

2.3. ЕКОНОМІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Електричну енергію застосовують усюди, тому що вона має винятково широкі властивості. Збільшується її споживання і для побутових потреб.

Збільшення витрати електроенергії створює труднощі в електропостачанні у визначені години доби й в окремі сезони року. Найбільші труднощі виникають в осінньо-зимовий час, а також у ранкові й вечірні години. Крім того, для виробництва енергії використовують невідновлювані енергетичні джерела – вугілля, нафту, природний газ, що в перспективі будуть вичерпані. Усе це змушує

проводити заходи щодо економії електричної енергії й ефективного використання енергетичних ресурсів.

Економія означає не обмеження і позбавлення електроенергії, а розумну й ощадливу її витрату.

Показовим є те, що в різних країнах для виробництва того самого виду і кількості продукції витрачається різна кількість електроенергії.

Економія електроенергії в побуті може здійснюватися завдяки застосуванню електропобутових приладів і освітлювальних пристроїв з *більш високим ККД, що підходять за типом і потужністю, шляхом недопущення роботи споживачів вхолосту* (зайві включені лампи, нагрівальні електроприлади, телевізори та ін.).

У промисловості електроенергію заощаджують за рахунок *обмеження часу роботи* електродвигунів і освітлювальних пристроїв вхолосту, *збільшення навантаження* механізмів і машин до номінального, *заміни недовантажених двигунів* іншими, які підходять за потужністю, *вибору найбільш економічного режиму роботи* трансформаторів, *зменшення їхнього числа при паралельній роботі*, використання джерел світла й освітлювальних пристроїв з *кращими енергетичними показниками*. Економію електроенергії (до 2...5%) можна отримати за рахунок точного зведення балансів, знаходження втрат і виявлення неврахованих споживачів. Для цього треба встановити сучасні лічильники електроенергії, що є першим етапом створення *автоматизованих систем контролю і обліку електроенергії (АСКОЕ)*. Такі системи дозволяють за допомогою комп'ютера зібрати дані з усіх лічильників, провести аналіз споживання, зробити прогноз і підготувати звіти. Економія електроенергії пов'язана і з перебудовою економіки. Необхідно вчасно замінити застарілі енергоємні технології на нові, більш прогресивні, які забезпечують мінімальне споживання електроенергії на одиницю продукції. Необхідні прогресивні норми витрати енергії, що відповідають оптимальним технологічним процесам.

Економія електроенергії приводить до зниження собівартості продукції і дає можливість виробити додаткову продукцію.

Втрати електроенергії – це даремно і безповоротно загублені енергетичні ресурси. Сьогодні, на відміну від минулих років, про ступінь розвитку і про стандарт життя в будь-якій країні судять не за кількістю виробленої електроенергії на душу населення, а за кількістю зробленої продукції на одиницю витраченої електроенергії або за кількістю електроенергії, що витрачається на одиницю національного доходу.

Якість електроенергії. Електрична енергія, вироблена на електростанціях, повинна мати *строго визначені параметри*.

Про якість електроенергії судять в основному за рівнем напруги і частоти електричного струму.

Тільки при живленні номінальною напругою і частотою споживачі електроенергії працюють в *оптимальному* режимі. Для одержання електричної енергії з номінальними параметрами на електростанціях і розподільних пристроях вводять *автоматичне регулювання напруги і частоти*.

Крім вищезазначених, державний стандарт передбачає контроль ще ряду параметрів.

ЛЕКЦІЯ 3

3.1. ЕЛЕКТРИЧНІ І МАГНІТНІ КОЛА

Електричний струм являє собою спрямований рух електричних зарядів.

Позитивним напрямком струму історично прийнято вважати напрямок руху позитивного заряду.

Сила струму I характеризується зарядом q , що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу t :

$$I = \frac{q}{t} . \quad (3.1)$$

Одиниці струму: ампер [А], мілі- [мА], мікро- [мкА] і кілоампер [кА].

Один ампер – це такий струм, коли за одну секунду через переріз провідника проходить заряд в 1 кулон [К].

У замкнутому колі струм протікає під дією *електрорушійної сили* (ЕРС) джерела енергії. ЕРС E підтримує *різницю потенціалів* на затискачах джерела енергії.

Чисельно ЕРС дорівнює енергії, що одержує всередині джерела одиничний електричний заряд.

Напруга на затискачах приймача показує, яка енергія витрачається в ньому одиничним електричним зарядом.

Напругу і ЕРС виражають у вольтах [В], мілівольтах [мВ], кіловольтах [кВ].

Одному вольту відповідає робота в один джоуль, що приходить на заряд в один кулон.

Електричне коло створює протидію проходженню електричного струму, оскільки спрямованому рухові електричних зарядів у будь-якому провіднику перешкоджають молекули й атоми. **Цю протидію називають електричним опором.** Опір виражають в омах [Ом].

Опір в 1 Ом має провідник, в якому напруга в 1 В створює струм у 1 А.

Більш великими одиницями опору є кілоом [кОм], мегаом [МОм].

Опір R провідника залежить від його питомого опору ρ , довжини l і площі поперечного перерізу S :

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (3.2)$$

Величина, зворотна опору g , називається *провідністю*:

$$g = \frac{1}{R}. \quad (3.3)$$

Електричне коло – сукупність пристроїв, що створюють шлях для електричного струму.

Основними елементами електричних кіл є *джерела й приймачі* (споживачі) електроенергії. Джерела й приймачі електроенергії з'єднують *проводами*, зазвичай мідними або алюмінієвими. У такий спосіб створюють замкнутий шлях для електричного струму.

Крім джерел і приймачів електроенергії, в електричних колах можуть бути *комутаційні апарати* (вимикачі, рубильники, тумблери та ін.), *апарати захисту* і *вимірювальні прилади*.

3.1.1. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

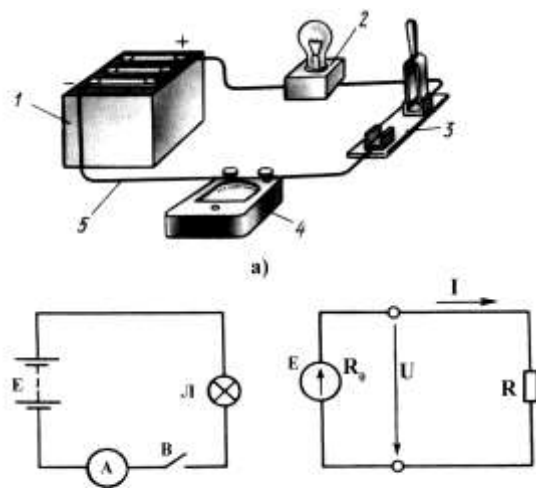


Рис. 3.1– Найпростіше електричне коло

У колах постійного струму розглядають електрорушійні сили (ЕРС), струми і напруги, що не змінюються з часом.

У цих колах джерелами електроенергії можуть бути випрямлячі, генератори постійного струму, акумулятори і гальванічні елементи. У них відбувається перетворення інших видів енергії в електричну енергію постійного струму. У приймачах (електродвигунах, нагрівачах, електролітичних ваннах, лампах розжарення та інших пристроях) електрична енергія постійного струму перетворюється в механічну, теплову, хімічну, світлову та інші види енергії.

Як приклад на рис. 3.1, а наведене найпростіше електричне коло, що складається з батареї акумуляторів 1, лампи розжарення 2, вимикача 3, амперметра 4 і сполучних проводів 5. Такому колу відповідають електрична і розрахункова схеми, представлені відповідно на рис. 3.1, б, в.

Закон Ома. Закон Ома встановлює залежність між напругою і струмом.

Стосовно до ділянки кола (в якому відсутні джерела струму) він формується таким чином: струм на ділянці електричного кола дорівнює напрузі на затискачах цієї ділянки, поділений на його опір:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.4)$$

Співвідношення між ЕРС, опором і струмом у замкнутому колі відповідно до закону Ома виражається формулою

$$I = \frac{E}{R + R_0}, \quad (3.5)$$

де R – опір зовнішньої частини кола; R_0 – внутрішній опір джерела.

Складні електричні кола. Складні електричні кола характеризуються наявністю гілок, вузлів, контурів.

Гілка – ділянка кола, уздовж якої проходить один і той самий струм і яка складається з послідовно з'єднаних елементів.

Вузол – місце з'єднання трьох і більш гілок.

Контур – будь-який замкнутий шлях кола, яким його можна обійти, рухаючись по гілках.

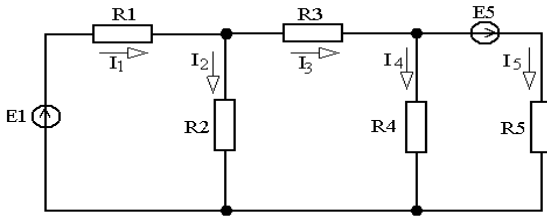


Рис. 3.2.–Складне електричне коло

Наприклад, коло на рис. 3.2 складається з п'яти гілок, трьох вузлів, шести контурів. Розрахунки електричних кіл виконують за допомогою законів Кірхгофа.

При цьому в більшості випадків приймачі електроенергії, ввімкнені в коло постійного струму, можна розглядати як резистори, що мають ті самі опори, що і реальні приймачі. У схемах резистори позначаються R_1, R_2, R_3, \dots

Відповідно до **першого закону Кірхгофа** сума струмів, спрямованих до вузла електричного кола, дорівнює сумі струмів, спрямованих від нього. Причому напрямок струмів до вузла вважається позитивним, від вузла – негативним. Наприклад, для вузла 2 на рис. 3.2 можна записати:

$$I_3 = I_4 + I_5; \text{ для вузла 3: } I_2 + I_4 + I_5 = I_1.$$

Відповідно до **другого закону Кірхгофа** В будь-якому замкнутому електричному контурі алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі напруг на опорах, що входять у цей контур. При цьому значення ЕРС і напруг вважають позитивними, якщо напрямок ЕРС і струмів збігається з обраним напрямком обходу контура. Наприклад, для зовнішнього контура схеми на рис. 3.2 можна записати:

$$E_1 - E_5 = I_1 R_1 + I_5 R_5 + I_3 R_3; \text{ для внутрішнього контура: } 0 = I_3 R_3 + I_4 R_4 - I_2 R_2.$$

З'єднання приймачів електроенергії. В електричних схемах часто мають справу з послідовним, паралельним і змішаним з'єднаннями резисторів. Струм I і сумарний еквівалентний опір R при різних способах з'єднання резисторів визначають у такий спосіб:

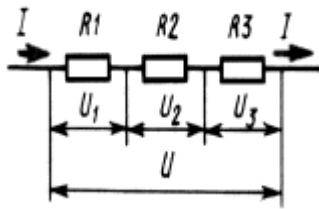


Рис. 3.3–Послідовне з'єднання резисторів

послідовне з'єднання (рис. 3.3)

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U}{R}; \quad (3.6)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3; \quad (3.7)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (3.8)$$

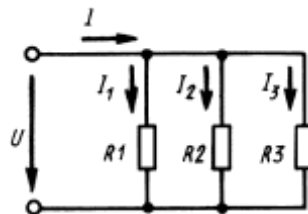


Рис. 3.4– Паралельне з'єднання резисторів

паралельне з'єднання (рис. 3.4)

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U}{R}; \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \quad (3.10)$$

$$\text{або } g = g_1 + g_2 + g_3. \quad (3.11)$$

В окремому випадку паралельного з'єднання двох резисторів R_1 і R_2 :

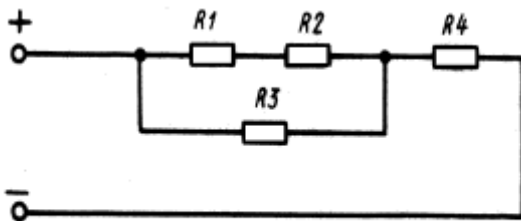


Рис. 3.5–Змішане з'єднання резисторів
резисторів R_1 і R_2 :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.12)$$

При змішаному з'єднанні визначення еквівалентного опору кола виконують поетапно. Наприклад, у схемі на рис. 3.5 спочатку визначають опір R_{12} послідовно включених ре-

$$R_{12} = R_1 + R_2,$$

потім еквівалентний опір паралельно з'єднаних резисторів з опором R_{12} і R_3 :

$$R_{123} = \frac{R_{12} R_3}{R_{12} + R_3}.$$

Нарешті, знаходять загальний опір усього кола:

$$R = R_{123} + R_4.$$

Аналогічно поступають і при розрахунку більш складних схем зі змішаним з'єднанням резисторів.

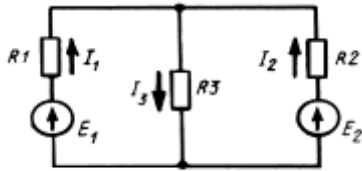


Рис. 3.6— До розрахунку складного кола

Розрахунок складних електричних кіл.

Складні електричні кола з декількома контурами і різним розміщенням у них джерел і споживачів енергії в загальному випадку не можна звести до сполучення паралельно і послідовно з'єднаних резисторів.

Для розрахунку складних кіл використовують різні методи. Найбільш загальним є *метод складання і вирішення рівнянь за законами Кірхгофа*.

Перед складанням рівнянь довільно задають напрямки струмів у гілках, показавши їх на схемі стрілками.

Число необхідних рівнянь дорівнює числу невідомих струмів, причому число рівнянь за першим законом Кірхгофа має бути на одне менше числа вузлів кола. Інші рівняння складають за другим законом Кірхгофа, причому слід вибирати контури найбільш прості і такі, щоб у кожному з них була хоча б одна гілка, що не входить у раніше складені рівняння.

Розглянемо для прикладу схему, показану на рис. 3.6. Для неї може бути складена система рівнянь

$$I_3 = I_1 + I_2;$$

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3;$$

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3.$$

Вирішуючи цю систему рівнянь, можна, наприклад, визначити струми I_1 , I_2 , I_3 , якщо відомі E_1 , E_2 , R_1 , R_2 , R_3 .

Електрична енергія і потужність. Для переносу заряду q по ділянці кола з напругою U на його кінцях витрачається енергія W :

$$W = qU. \quad (3.13)$$

Потужність P – це витрата енергії в одиницю часу:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{q}{t} U = IU. \quad (3.14)$$

З огляду на закон Ома можна одержати інші вирази для потужності електричного струму на ділянці кола з опором R :

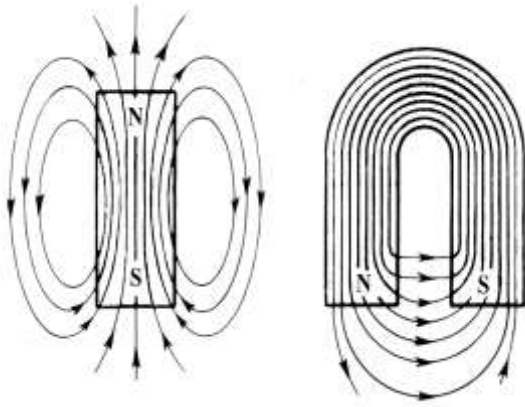


Рис. 4.1–Магнітне поле прямого і підковоподібного магніту

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (3.15)$$

При використанні основних одиниць (кулон, ампер, вольт, ом, секунда) потужність виражається у *ватах*, енергія – у *джоулях*. В енергетиці користуються значно більшими величинами – кіловатами [кВт], мегаватами [МВт], кіловат – годинами [кВт – год.], мегават – годинами [МВт – год.].

ЛЕКЦІЯ 4

4.1. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Магнітне поле. Магнітне поле виникає у просторі, що оточує електричні заряди, які рухаються, і постійні магніти. Воно впливає тільки на заряди, що рухаються.

Загальновідома дія постійних магнітів і електромагнітів на ферромагнітні тіла, існування і нерозривну єдність полюсів магнітів і їхня взаємодія (різноміненні полюси притягаються, однойменні відштовхуються). За аналогією з магнітними полюсами Землі полюси магнітів називають *північним* і *південним*.

Магнітне поле наочно зображується *магнітними силовими лініями*, що задають напрямок магнітного поля у просторі (рис. 4.1). Ці лінії не мають ні початку, ні кінця, тобто є *замкнутими*.

У просторі, що оточує магніт або електромагніт, за позитивний напрямок магнітних силових ліній умовно прийнятий напрямок від північного полюса до південного. Чим інтенсивніше магнітне поле, тим вища щільність силових ліній. Силві лінії магнітного поля прямолінійного провідника являють собою концентричні окружності, що охоплюють провід. Чим сильніший струм, тим сильніше магнітне поле навколо проводу. При віддаленні від проводу зі струмом магнітне поле слабшає.

Напрямок магнітних силових ліній визначається правилом буравчика: якщо вкручувати гвинт за напрямком струму, то магнітні силові лінії будуть спрямовані по ходу гвинта (рис. 4.2, а).

Для одержання більш сильного магнітного поля застосовують котушки з обмоткою з дроту. У цьому разі магнітні поля окремих витків котушки складаються і їхні силові лінії зливаються в загальний магнітний потік. Магнітні силові лінії виходять з котушки на тому кінці, де струм спрямований проти ходу годинникової стрілки, тобто цей кінець є північним магнітним полюсом (рис. 4.2, б). При зміні напрямку струму в котушці зміниться і напрямок магнітного поля.

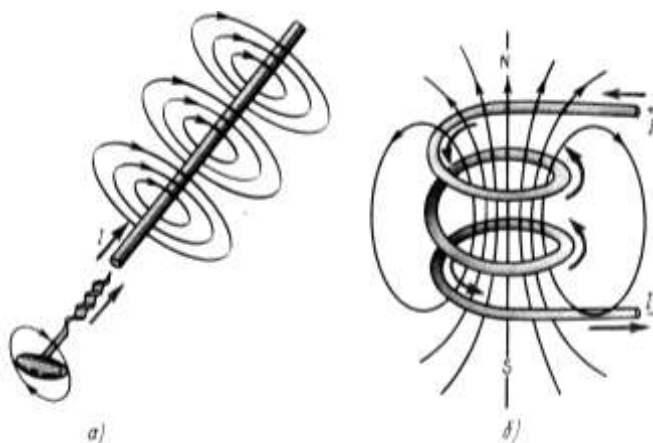


Рис. 4.2–Магнітне поле прямого проводу і котушки

Магнітна індукція. Розглянемо провідник зі струмом I , розташований перпендикулярно напрямкові магнітних силових ліній однорідного магнітного поля.

Напрямок дії електромагнітної сили F на провідник визначається «правилом лівої руки»: якщо розташувати ліву руку так, щоб магнітні лінії пронизували долоню, а витягнуті чотири пальці вказували напрямком струму в провіднику, то відігнутий великий палець вкаже напрямком дії електромагнітної сили.

За цією силою можна судити про *інтенсивність магнітного поля*, тобто про його *магнітну індукцію B* . Якщо на провідник довжиною один метр зі струмом 1 А, розташований перпендикулярно до магнітних ліній у рівномірному магнітному полі, діє сила в один ньютон, то магнітна індукція такого поля дорівнює одній теслі [Тл].

Магнітна індукція – векторна величина: в кожній точці поля вектор магнітної індукції спрямований по дотичній до магнітних силових ліній.

Магнітний потік. Величина, вимірювана добутком магнітної індукції B на площу S , перпендикулярну до вектора магнітної індукції, називається *магнітним потоком, Φ* :

$$\Phi = BS. \quad (4.1)$$

Якщо магнітну індукцію виражають у теслах, а площу в квадратних метрах, то потік виражається у веберах [Вб]: $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \times 1 \text{ м}^2$.

Магніторушійна сила (МРС). Здатність струму збуджувати магнітне поле характеризується *магніторушійною силою*, що діє уздовж замкнутої магнітної силової лінії. МРС дорівнює струму, що створює магнітне поле, і виражається в амперах.

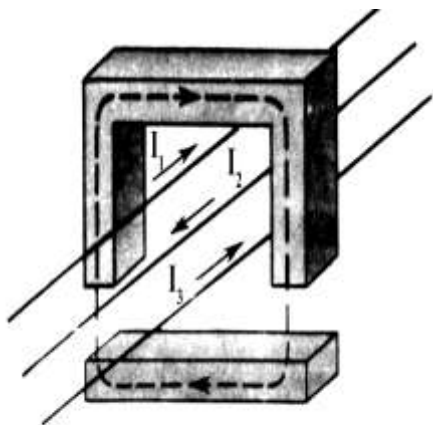


Рис. 4.3—Контур магнітного кола, зчеплений зі струмами

Для провідника зі струмом I МРС дорівнює струму I . У загальному випадку, коли замкнутий контур магнітної силової лінії охоплює кілька струмів, сумарна МРС дорівнює сумі струмів. Наприклад, для випадку, показаного на рис. 4.3, МРС

$$\Sigma I = I_1 - I_2 + I_3.$$

Для котушки з числом витків ω і струмом I (рис. 4.4) МРС

$$\Sigma I = I\omega.$$

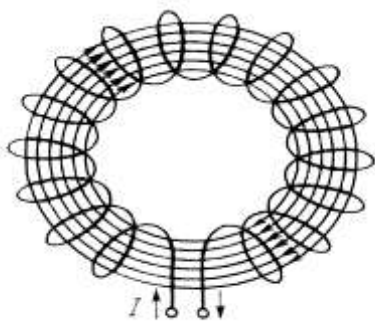


Рис. 4.4—Тороїдальна котушка

Напруженість магнітного поля. МРС, що приходить на одиницю довжини магнітної силової лінії, називається *напруженістю магнітного поля* H і виражається в амперах на метр.

Якщо фізичні умови вздовж усієї довжини l магнітної лінії однакові, то

$$H = \Sigma I / l. \quad (4.2)$$

Наприклад, навколо прямолінійного провідника зі струмом I лінії магнітного поля являють собою концентричні окружності змінного радіуса x , довжина кожної з яких $l = 2\pi x$. У цьому разі напруженість $H = I/(2\pi x)$, тобто *в міру віддалення від провідника напруженість поля знижується*.

Провідник зі струмом у магнітному полі. Відомо, що на провідник зі струмом у магнітному полі відповідно до правила лівої руки діє електромагнітна сила F , яка «прагне» змістити його в площині, перпендикулярній до напрямку

ку вектора B магнітної індукції поля. Ця сила тим більша, чим більший струм I у провіднику й індукція магнітного поля B , чим довша активна (що знаходиться

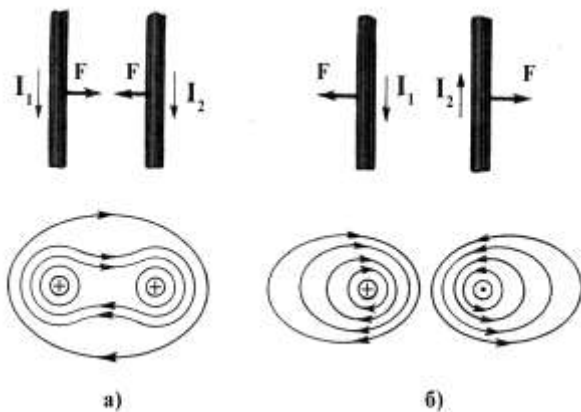


Рис. 4.5–Взаємодія двох провідників зі струмом

в магнітному полі) частина провідника l . Електромагнітна сила визначається за формулою

У результаті впливу таких механічних сил при однаковому напрямку струму провідники, які лежать поруч, будуть *притягуватися* один до одного (рис. 4.5, а), при різному напрямку струму – *відштовхуватися* (рис. 4.5, б).

$$F = B \times I \times l \times \sin \alpha, \quad (4.3)$$

де α – кут, під яким прямолінійний провідник розташований відносно магнітних силових ліній поля.

Особливо великі сили між провідниками виникають в електричних колах при коротких замиканнях.

Явище електромагнітної індукції полягає в тому, що зміна магнітного поля навколо провідника, зв'язана з перетинанням провідника магнітними силовими лініями, викликає появу ЕРС у цьому провіднику. При цьому байдуже, чи буде змінюватися магнітне поле відносно провідника, чи провідник буде переміщуватися в магнітному полі. Індукована ЕРС прямо пропорційна індукції B , активній довжині провідника l і швидкості його переміщення в напрямку, перпендикулярному до ліній магнітного поля:

$$e = Blv \sin \alpha, \quad (4.4)$$

де α – кут між напрямками швидкості v і поля. Якщо $\alpha = 90$ (що буває часто), то $e = BLv$. Напрямок ЕРС визначають згідно з «правилом правої руки».

Якщо поставити праву руку так, щоб магнітні лінії входили в долоню, а відставлений великий палець вказував напрямок руху провідника, то витягнуті чотири пальці вкажуть напрямок індукованої ЕРС.

При зміні магнітного потоку, охоплюваного замкнутим контуром, у ньому індукується ЕРС

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (4.5)$$

де Δt – проміжок часу, протягом якого потік змінюється на $\Delta\Phi$.

У котушці з w витками

$$e = -w\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (4.6)$$

Знак мінус відображає *правило Ленца*: індукована ЕРС прагне протидіяти причині, що її викликає.

Вихрові струми. У магнітопроводах електротехнічних пристроїв при проходженні змінних магнітних потоків наводяться ЕРС і виникають так звані *вихрові струми*. Ці струми, нагріваючи магнітопровід, створюють додаткові втрати та розмагнічувальну дію.

Самоіндукція. При зміні струму в провіднику, витку або котушці, змінюється магнітний потік, створюваний цим струмом. Зміна магнітного потоку індукує у провіднику (витку, котушці) ЕРС, дія якої за правилом Ленца спрямована на підтримку попереднього стану поля. Таке явище називається *самоіндукцією*.

Явище самоіндукції в тих або інших провідниках характеризується *індуктивністю L* .

Індуктивність – це розмірний коефіцієнт пропорційності між швидкістю зміни струму в часі й індукованою при цьому ЕРС:

$$e = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}. \quad (4.7)$$

Знак мінус у формулі відбиває правило Ленца.

Одиницею індуктивності є генрі [Гн], таку індуктивність має провідник, в якому виникає ЕРС самоіндукції, що дорівнює 1 В, при зміні струму на 1 А за 1 с.

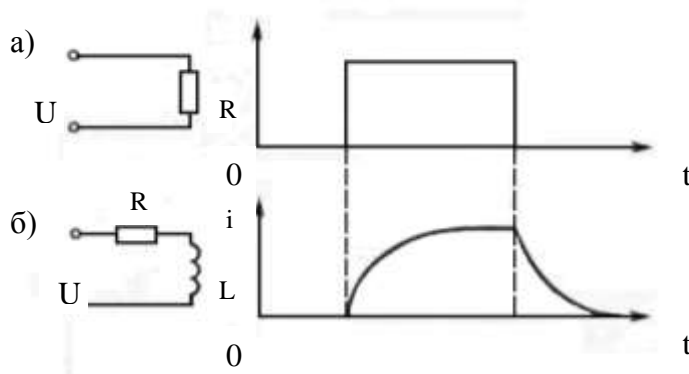
Значення індуктивності L залежить від конструкції елементів кола. Так, для котушки з числом витків w , з магнітопроводом довжиною l , перетином S і магнітною проникністю μ_a

$$L = \frac{w^2 S}{l} + \mu_a. \quad (4.8)$$

Якщо котушки своїми полями не впливають одна на одну, то *при послідовному з'єднанні* котушок з індуктивностями L_1, L_2, L_3, \dots загальна індуктивність

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots \quad (4.9)$$

При *паралельному з'єднанні*



$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots \quad (4.10)$$

У багатьох випадках явищем самоіндукції можна знехтувати, вважаючи, що коло не має індуктивності. На рис. 4.6, *а* показано, як змінюється струм *i* в колі з індуктивністю *L*. У колі з індуктивністю

Рис. 4.6—Наростання і спад струму при відсутності самоіндукції (а) та при її наявності (б)

(рис. 4.6, *б*) струм не миттєво досягає значення, зумовленого опором кола і прикладеною напругою. Внаслідок самоіндукції відбувається уповільнення наростання струму *i*. При відключенні кола виникаюча при зменшенні струму ЕРС самоіндукції «прагне» підтримувати струм *i* в попередньому напрямку.

Енергія магнітного поля. Магнітне поле, що оточує провідник зі струмом, має *енергію*. Вона накопичується при наростанні струму в колі і підтримує струм при відключенні кола від джерела електроенергії.

У котушці зі струмом *I*, що має індуктивність *L*, ця енергія

$$A = \frac{LI^2}{2}. \quad (4.11)$$

Енергія магнітного поля визначається роботою, яку витрачає струм на створення цього поля.

Взаємна індукція. Якщо дві котушки зі струмом розташувати поруч, то магнітне поле кожної з них буде пронизувати контур іншої.

Взаємною індукцією називається явище наведення ЕРС в одному колі (контурі, котушці) при зміні струму в іншому колі.

Для оцінки ступеня магнітного зв'язку контурів вводиться поняття *взаємної індуктивності M*.

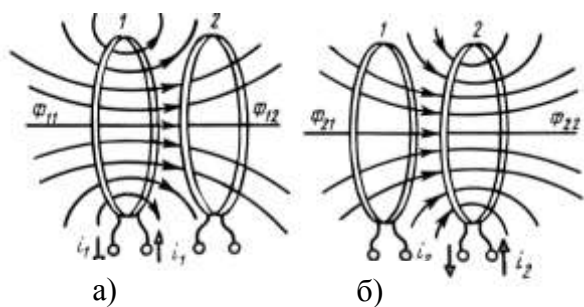


Рис. 4.7–Магнітний зв'язок двох котушок

Розглянемо магнітний зв'язок двох котушок, розташованих досить близько одна від одної (рис. 4.7). При проходженні по котушці 1 змінного струму i_1 частина загального магнітного потоку Φ_{11} , створювана цим струмом, – вона дорівнює Φ_{12} , –

пронизує котушку 2 і наводить у ній ЕРС (рис. 4.7, а). Потік Φ_{12} , так само як і Φ_{11} , пропорційний струмові i_1 :

$$\Phi_{12} = Mi_1. \quad (4.12)$$

Аналогічно при проходженні струму i_2 в котушці 2 наводиться ЕРС у котушці 1 (рис. 4.7, б) змінним магнітним потоком:

$$\Phi_{21} = Mi_2. \quad (4.13)$$

Взаємна індуктивність може бути виражена через індуктивність L_1 і L_2 котушок:

$$M = k\sqrt{L_1L_2}, \quad (4.14)$$

де коефіцієнт $k < 1$ і показує, що не весь магнітний потік є загальним для обох котушок.

4.2. МАГНІТНІ КОЛА

Магнітне коло. Магнітне поле електротехнічних пристроїв звичайно прагнуть підсилити і зосередити, застосовуючи магнітопроводи з феромагнітних матеріалів, по яких замикається магнітний потік постійного магніту або електромагніту.

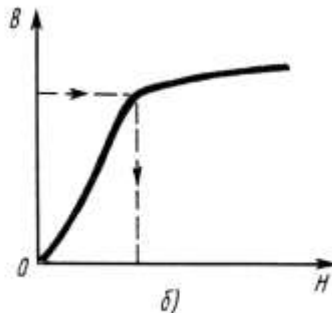
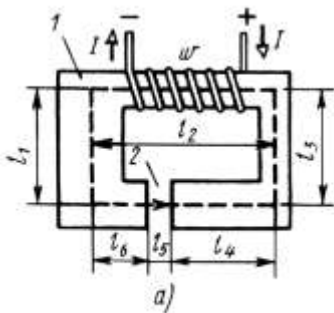
Сукупність магнітопроводів і повітряних зазорів, у яких поширюється магнітний потік, складає магнітне коло електричної машини, апарата або приладу.

Закон повного струму. У більшості електротехнічних пристроїв магнітний потік замикається по колу, що складається з декількох ділянок, наприклад k . У межах кожної з цих ділянок напруженість магнітного поля можна вважати постійною. У цьому випадку магніторушійна сила (МРС) дорівнює сумі добутків напруженості поля на довжину відповідної ділянки магнітного кола:

$$\Sigma I = \omega I = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_k l_k = \sum_{i=1}^k H_i l_i. \quad (4.15)$$

Це рівняння виражає закон повного струму для магнітного кола.

Розрахунок магнітного кола. Метою розрахунків магнітних кіл електротехнічних пристроїв найчастіше є визначення МРС, потрібної для одержання необхідної магнітної індукції (наприклад, магнітної індукції в повітряному зазорі електричної машини). Основою для розрахунку є закон повного струму для



магнітного кола:

$$\sum Hl = I\omega. \quad (4.16)$$

Розглянемо послідовність розрахунку на прикладі магнітного кола, зображеного на рис. 4.8, а. Коло

Рис. 4.8—Розрахунок магнітного кола

утворене магнітопроводом I з листової електротехнічної сталі з повітряним зазором 2 довжиною l_5 . Магнітопровід можна розділити на ділянки довжиною l_1 , l_2 і т. д., на кожній з яких переріз магнітопровода постійний і відповідно дорівнює S_1 , S_2 і т.д. Якщо задано індукцію в повітряному зазорі B_5 , то можна визначити магнітний потік, вважаючи, що переріз потоку в зазорі дорівнює площі перерізу прилягаючої ділянки S_4 :

$$\Phi = B_5 S_4.$$

Індукція на ділянках магнітопроводу визначається за формулами:

$$B_1 = \Phi/S_1 = B_5; B_2 = \Phi/S_2 \text{ і т.д.}$$

Потім із графіка залежності $B(H)$ (рис. 4.8, б) за знайденим значенням B визначають напруженості H_1 , H_2 і т. д. для різних ділянок магнітопроводу. Напруженість поля в повітряному зазорі $H_5 = B_5 / \mu_0$ (тому що для повітря $\mu_r = 1$, а $\mu_a = \mu_0 \mu_r = \mu_0$).

Довжину кожної з ділянок магнітопроводу з різними перерізами вираховують по середній магнітній лінії, як показано пунктиром на рис. 4.8, а.

Знайшовши значення H , розраховують значення МРС за законом повного струму:

$$I\omega = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_5 l_5.$$

Знаючи $I\omega$, можна визначити I , якщо задано ω , або, навпаки, знайти ω , якщо задано значення I .

Використання магнітного поля. Магнітні поля використовують в електричних машинах і трансформаторах, електричних апаратах, вимірювальних приладах та інших електротехнічних пристроях. Магніти необхідні в магнітофонах і програвачах, радіоприймачах і телевізорах, електробритвах і пілососах.

Потужні магнітні поля необхідні в сучасних енергетичних і фізичних установках, наприклад, для формування потоку заряджених часток у прискорювачах, для утримання плазми в камерах магнітних пасток у фізичних установках. Сильне магнітне поле створюють у *магнітогідродинамічних генераторах*, з якими пов'язаний прогресивний напрямок у розвитку електроенергетики.

Електромагніти є елементами конструкцій багатьох технологічних установок і механізмів. Так, для підйому і транспортування феромагнітних матеріалів застосовують *піднімальні електромагніти*; для пуску, гальмування і перемикання швидкостей у кінематичних вузлах верстатів широко застосовують *електромагнітні муфти*; для утримання деталей на плоскошліфувальних верстатах – *електромагнітні плити*; для видалення сталевих і чавунних тіл з маси сипучого оброблюваного матеріалу – *магнітні сепаратори*; для керування потоками газів і рідин – *електромагнітні крани і клапани*.

Електромагнітне поле використовують і безпосередньо в технологічних процесах. Так, для термічної обробки деталей, нагрівання і розплавлювання металів широко застосовують *індукційні установки*, в яких виділення теплоти відбувається за рахунок вихрових струмів, що наводяться в металі змінним магнітним потоком.

ЛЕКЦІЯ 5

5.1. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Майже вся електроенергія виробляється у вигляді енергії змінного струму. Можливість одержувати змінний струм різної напруги (високої для передачі енергії на великі відстані, низької – для живлення різних споживачів), простота влаштування генераторів і двигунів змінного струму, надійність їхньої роботи, зручність експлуатації і високі техніко–економічні показники забезпечили змінному струмові повсюдне широке застосування.

У колах змінного струму розглядають струми, ЕРС і напруги, що періодично змінюють напрямок і значення. Зміни повторюються через деякий проміжок T , який називається *періодом*. Число періодів у секунду називається *частотою* f .

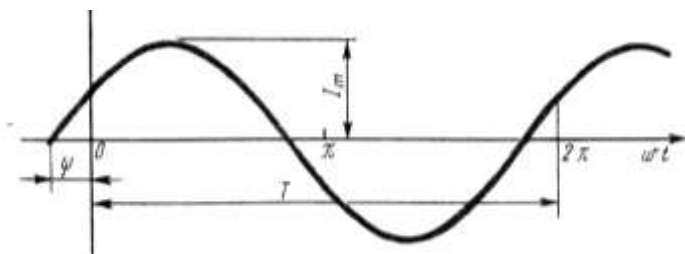


Рис. 5.1–Часова діаграма змінного струму

значення описується формулою

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi), \quad (5.1)$$

де I_m – максимальне значення (амплітуда) струму; $\omega = 2\pi/T = 2\pi/f$ – кутова частота; ψ – початкова фаза (значення аргументу в початковий момент часу, тобто при $t = 0$).

Період виражають у секундах [с], частоту – у герцах [Гц], фазу – у радіанах [рад] або градусах [град], кутову частоту – у радіанах на секунду [рад/с].

Усе сказане про синусоїдальний струм стосується також синусоїдальних ЕРС і напруги.

Широко використовується і дуже зручний для вивчення *синусоїдальний струм*.

На рис. 5.1 наведене графічне зображення (часова діаграма) синусоїдального струму. Його миттєве

Діюче значення струму. Енергетична дія струму (теплова і здатність виконувати механічну роботу) характеризується його діючим значенням.

Між діючими й амплітудними значеннями синусоїдальних величин існують співвідношення:

$$I = I_m / \sqrt{2}; \quad U = U_m / \sqrt{2}; \quad E = E_m / \sqrt{2}. \quad (5.2)$$

На шкали амперметрів і вольтметрів змінного струму звичайно наносять діючі значення струму і напруги.

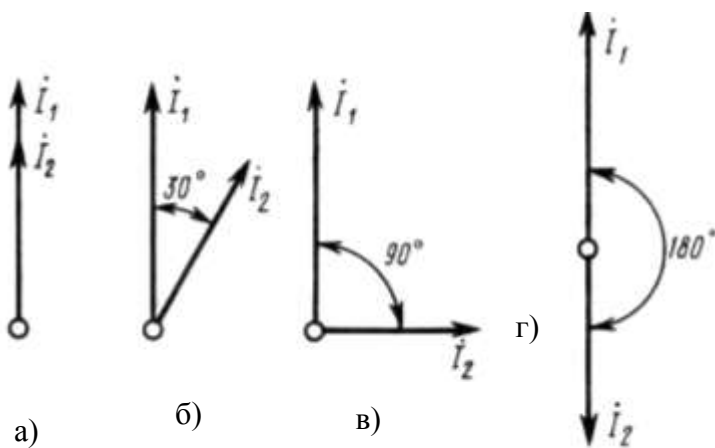


Рис. 5.2—Векторні діаграми для струмів з різним зсувом фаз

Векторні діаграми. При розгляді багатьох питань, пов'язаних з колами синусоїдального струму, зокрема при їх розрахунках, зручно користуватися векторними діаграмами. Вони дозволяють зображувати синусоїдальні величини простіше, ніж за допомогою часових діаграм.

Метод векторних діаграм полягає в наступному. Змінні струми, напруги, ЕРС зображують у вигляді векторів, що позначають відповідною прописною буквою з крапкою: \dot{I} , \dot{U} , \dot{E} . Вектори зображують нерухомими, з урахуванням зсуву по фазі і мають на увазі, що вони рівномірно обертаються проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю (ω). При такому обертанні вектора його проекція на вертикальну вісь змінюється в часі за законом синуса з урахуванням початкової фази.

На рис. 5.2, а-г для прикладу показані векторні діаграми двох струмів, зсунутих на 0, 30, 90 і 180°.

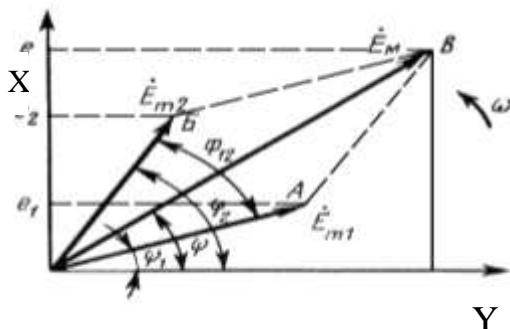


Рис. 5.3—Додавання векторів двох ЕРС

Додавання синусоїдальних величин можна замінити додаванням векторів, що їх зображують. Наприклад, на рис. 5.3 наведено додавання двох синусоїдальних ЕРС: $e_1 = E_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$ і $e_2 = E_{m2} \sin(\omega t + \psi_2)$, представлених векторами \vec{OA} і \vec{OB} .

Результат додавання – вектор \overline{OB} , якому відповідає $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$. Звичайно на векторних діаграмах зображають діючі значення струмів, напруг, ЕРС.

Найпростіші кола змінного струму. Найпростішим колом є коло з одним опором R (рис. 5.4, а). При синусоїдальній напрузі на затискачах $u = E_m \sin \omega t$ струм у колі з опором R за законом Ома дорівнює

$$i = \frac{u}{R} = \frac{E_m}{R} \sin \omega t, \quad (5.3)$$

є синусоїдальним і збігається за фазою з прикладеною напругою. На рис. 5.4 це показано за допомогою часової (б) і векторної (г) діаграм. Амплітуді струму $I_m = U_m / R$ відповідає і діюче значення $I = U / R$. Опір R називається *активним опором кола*. Провідність кола $g = 1/R$.

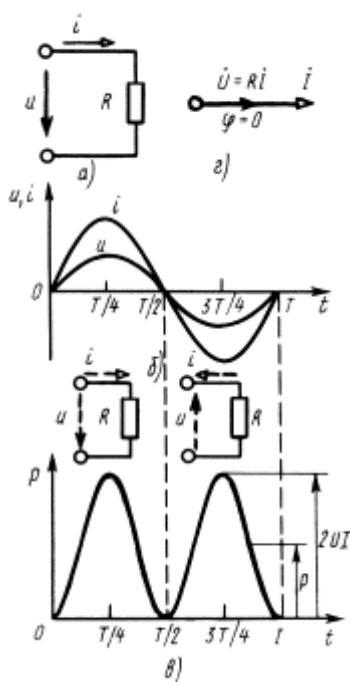


Рис. 5.4– Схема електричного кола з активним опором (а), графіки миттєвих значень напруги і струму (б), потужності (в), а також векторна діаграма (г)

Миттєві значення потужності визначаються добутком миттєвих значень струму і напруги. Як показано на рис. 5.4, в, *потужність завжди позитивна*. Середня споживана в колі потужність

$$P = I^2 R = IU \quad (5.4)$$

називається *активною потужністю* і виражається у ватах [Вт].

Поверхневий ефект. Активний опір для провідників завжди більший омичного опору постійному струмові внаслідок так званого *поверхневого ефекту*.

Останній зумовлений тим, що навколо провідника із змінним струмом створюється змінне магнітне поле.

Для струмів, що проходять у центральній частині провідника, створюється найбільша ЕРС самоіндукції, тому що ці струми оточені найбільшим магнітним потоком. У результаті струм наче витісняється в зовнішню частину провідника, «робочий переріз» провідника зменшується й опір зростає. На частоті 50 Гц цей ефект майже відсутній, але він дуже сильно виявляється на високих частотах (рис. 5.5).

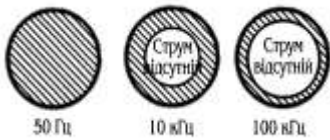


Рис. 5.5. Поверхневий ефект

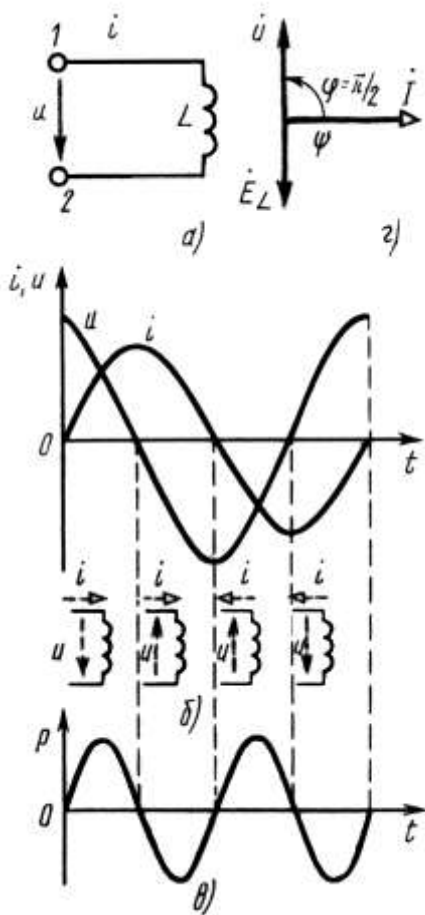


Рис. 5.6—Схема електричного кола з індуктивністю (а), графіки миттєвих значень напруги і струму (б), потужності (в), а також векторна діаграма (г)

Коло з індуктивною котушкою. Розглянемо коло з ідеальною (такою, що не має активного опору) котушкою індуктивності (рис. 5.6, а).

При проходженні синусоїдального струму $i = I_m \sin \omega t$ напруга на котушці $u_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$. Вона синусоїдальна й у момент найбільшої швидкості зміни струму $\Delta i / \Delta t$ (при переході через нульове значення) досягає найбільшого значення. При нульовій швидкості зміни струму (при переході через амплітудне значення) напруга на котушці дорівнює нулю (рис. 5.6, б).

Таким чином, в ідеальній котушці індуктивності кут зсуву фаз між напругою і струмом дорівнює $\pi/2$ (90°), причому напруга за фазою випереджає струм, як показано на векторній діаграмі (рис. 5.6, г).

Через деякий дуже малий проміжок часу Δt після того, як i був рівним нулю,

$\Delta i = I_m \sin \omega \Delta t \approx I_m \omega \Delta t$, оскільки для малих аргументів $\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$. Тоді

$$u_L = U_m = L \frac{I_m \omega \Delta t}{\Delta t} = LI_m \omega. \quad (5.5)$$

Величину $U_m / I_m = U / I = \omega L = X_L$ називають **індуктивним опором**. Він визначає здатність індуктивної котушки протидіяти проходженню змінного струму і виражається в омах.

Чим більше ω і L , тим вище X_L . Провідність кола $b = 1/X_L$.

Миттєве значення потужності в розглянутому колі може бути знайдене як добуток миттєвих значень струму і напруги i , як видно з рис. 5.6, в, змінюється за синусоїдальним законом з частотою 2ω .

Очевидно, що **активна потужність такого кола дорівнює нулю.**

При позитивному значенні потужності вона споживається індуктивністю, при негативному віддається назад до джерела. Такий енергетичний стан кола характеризується так званою реактивною потужністю $Q_L = I^2 \omega L =$

$= ULI$. Одиниця реактивної потужності – вольт-ампер реактивний (вар).

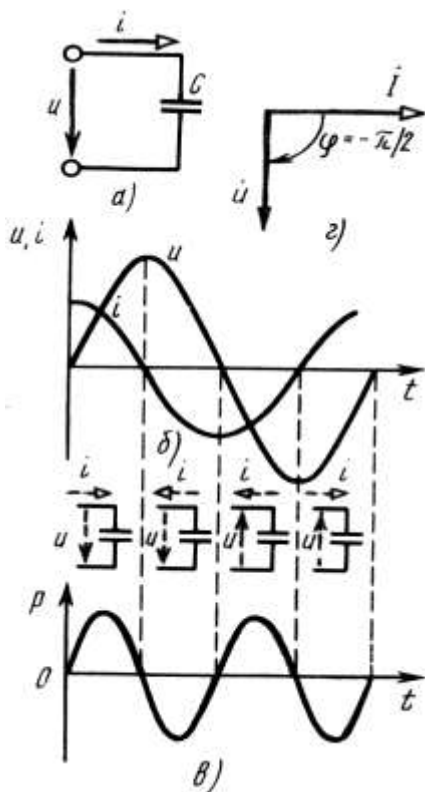


Рис. 5.7. - Схема електричного кола з конденсатором (а), графіки миттєвих значень напруги і струму (б), потужності (в), а також векторна діаграма (г)

Кола з конденсатором. Розглянемо коло (рис. 5.7, а) з конденсатором, до затисків якого прикладена напруга $u = U_m \sin \omega t$.

Струм у колі конденсатора $i_c = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$. У момент найбільшої швидкості зміни напруги (при переході через нульове значення) через конденсатор протікає максимальний струм. Якщо напруга не змінюється в часі (при переході через амплітудне значення), струм конденсатора дорівнює нулю (рис. 5.7, б).

Таким чином, у конденсаторі кут зсуву між напругою і струмом також дорівнює $\pi/2$ (90°), причому за фазою напруга відстає від струму, як це показано на векторній діаграмі (рис. 5.7, г).

У момент часу Δt після проходження кривої синусоїдальної напруги через нуль можна записати: $\Delta u = U_m \sin \omega \Delta t \approx U_m \omega \Delta t$. Тоді $i = I_m = C \frac{U_m \omega \Delta t}{\Delta t} = \omega C U_m$.

Величина $U_m/I_m = U/I = 1/(\omega C) = X_C$ називається **ємнісним опором**. Він визначає здатність конденсатора зменшувати змінний струм і виражається в омах.

Чим більше C і ω , тим менший ємнісний опір. Провідність кола $b = 1/X_C$.

Енергетичний стан кола характеризується обміном енергії між конденсатором і джерелом (рис. 5.7, в). Цьому процесові також відповідає **реактивна потужність**.

Індуктивний і ємнісний опори називають *реактивними*. У зв'язку з розходженням фазових зсувів струму і напруги на індуктивності і ємності умовно прийнято вважати індуктивний опір споживачем, а ємнісний – генератором реактивної потужності.

Розрахунок кіл змінного струму. При розрахунках кіл змінного струму, так само як і кіл постійного струму, використовують закони Ома і Кірхгофа.

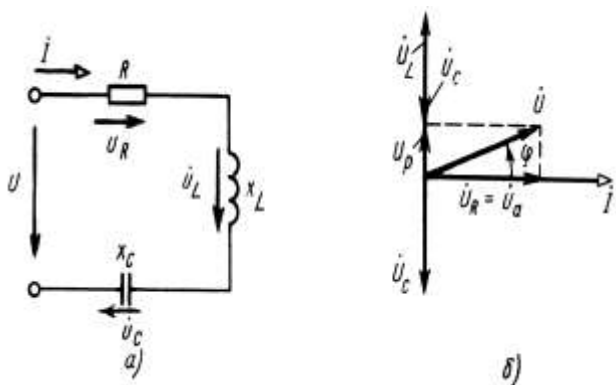


Рис. 5.8—Схема електричного кола з послідовним з'єднанням активного, індуктивного і ємнісного опору та векторна діаграма для його розрахунку

Відмінність у застосуванні цих законів полягає в тому, що в колах змінного струму необхідно враховувати кути зсуву фаз між струмами і напругами.

Послідовне з'єднання. Розглянемо загальний випадок послідовного з'єднання резистора, котушки індуктивності і конденсатора (рис. 5.8, а). Для спадів напруги на окремих елементах можна

записати: $U_R = IR$, $U_L = IX_L$; $U_C = IX_C$.

Ці спадання напруги мають відповідні кути зсуву фаз стосовно загального струму кола I .

На векторній діаграмі (рис. 5.8, б) відкладені вектори \dot{U}_R , \dot{U}_L , \dot{U}_C , і їх додаванням побудований вектор \dot{U} , що має активну $\dot{U}_a = \dot{U}_R$ і реактивну $\dot{U}_p = \dot{U}_L + \dot{U}_C$ складові. Для сумарної напруги U можна записати:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (5.6)$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ називається повним опором кола і виражається в омах.

Співвідношення $U/I = Z$ – вираження закону Ома для кола змінного струму. Повна провідність кола $y = 1/Z$.

Кут зсуву фаз між струмом і напругою кола визначається тригонометричними функціями $\cos\varphi = U_R/U = R/Z$; $\sin\varphi = (U_L - U_C)/U = (X_L - X_C)/Z$. Якщо $X_L > X_C$, то вектор \dot{U} випереджає вектор \dot{I} , якщо $X_L < X_C$, то \dot{U} відстає від \dot{I} .

Активна потужність кола

$$P = U_R I = UI \cos \varphi, \quad (5.7)$$

реактивна потужність

$$Q = (U_L - U_C) I = UI \sin \varphi. \quad (5.8)$$

Добуток діючих значень напруги і струму кола називається *повною потужністю*:

$$S = UI. \quad (5.9)$$

Очевидно, що $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, тому що $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$.

Величина $\cos \varphi$ називається коефіцієнтом потужності.

Резонанс напруг. У розглянутому колі з послідовним з'єднанням елементів R , L , і C при рівності реактивних опорів X_L і X_C має місце так званий *резонанс напруг*. Оскільки ці опори залежать від частоти, резонанс настає при деякій *резонансній частоті* ω_0 :

$$1/(\omega_0 C) = \omega_0 L; \quad \omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (5.10)$$

Загальний опір кола в цьому разі мінімальний і чисто активний $Z = R$, а струм має максимальне значення. При $\omega < \omega_0$ навантаження має активно-ємнісний характер, при $\omega > \omega_0$ – активно-індуктивний.

При заданій частоті ω резонанс може бути досягнутий зміною L або C .

Слід зазначити, що різкому збільшенні струму в колі при резонансі відповідає зростання U_L і U_C . Ці напруги можуть стати значно більшими від напруги U , прикладеної до затисків кола, *тому резонанс напруг – явище, небезпечне для електричних установок.*

У техніці зв'язку й в автоматичі явище резонансу напруг широко використовують для настроювання прийомних і передавальних пристроїв на певну частоту.

Паралельне з'єднання. Струми в гілках паралельно з'єднаних елементів кіл мають відповідний фазовий зсув стосовно загальної напруги цих кіл. Тому загальний струм кола дорівнює сумі струмів окремих гілок з урахуванням фазових зсувів. Інакше кажучи, в цьому випадку *вектор загального струму визначається сумою векторів струмів паралельних гілок.*

Розглянемо паралельне з'єднання трьох елементів, що мають активний опір R , індуктивний X_L і ємнісний X_C (рис. 5.9, а).

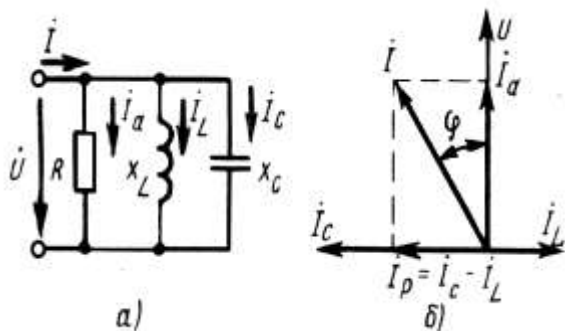


Рис. 5.9—Схема електричного кола з паралельним з'єднанням активного, індуктивного і ємнісного опорів та векторна діаграма для його розрахунку

Для струмів гілок можна записати:

$$I_R = \frac{U}{R} U_g; \quad I_L = \frac{U}{X_L} U_{bL}; \quad I_C = \frac{U}{X_C} U_{bC}.$$

На векторній діаграмі (рис. 5.9, б) відкладені вектори \dot{I}_R , \dot{I}_L , \dot{I}_C , і їх додаванням побудований вектор \dot{I} , що має активну $\dot{I}_a = \dot{I}_R$ і реактивну $\dot{I}_p = \dot{I}_L + \dot{I}_C$ складові. Для

сумарного струму I маємо:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = Uy. \quad (5.11)$$

Кут зсуву фаз φ між струмом I і напругою U визначається тригонометричними функціями: $\cos \varphi = I_R/I = g/y$; $\sin \varphi = (I_L - I_C)/I = (b_L - b_C)/y$.

Якщо $b_L > b_C$, то навантаження в цілому має активно-індуктивний характер (вектор \dot{U} випереджає \dot{I}), якщо $b_L < b_C$ – активно-ємнісний (вектор \dot{U} відстає від вектора \dot{I} на кут φ).

Активна потужність кола

$$P = UI_R = UI \cos \varphi,$$

реактивна потужність

$$Q = U(I_L - I_C) = UI \sin \varphi,$$

повна потужність

$$S = UI = P / \cos \varphi = Q / \sin \varphi.$$

Резонанс струмів. При рівності реактивних опорів $X_C = X_L$ у колі з паралельним з'єднанням елементів R , L , C виникає *резонанс струмів*. Струм при резонансі досягає мінімального значення $I = U/R$, а $\cos \varphi$ – максимального ($\cos \varphi = 1$).

Значення резонансної частоти встановлюється за формулами:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}). \quad (5.12)$$

Струми в гілках, що містять L і C , при резонансі можуть бути більшими від загального струму кола.

Індуктивний і ємнісний струми протилежні за фазою, рівні за значенням і стосовно джерела енергії взаємно компенсуються, тобто йде обмін енергією між індуктивною котушкою і конденсатором.

Реактивна потужність кола при резонансі струмів дорівнює нулю, оскільки рівні і протилежно спрямовані струми I_L і I_C . Іншими словами, реактивна потужність, споживана в X_L , дорівнює реактивній потужності, яку генерує X_C .

Компенсація реактивної потужності. Режим, близький до резонансу струмів, широко використовують для підвищення коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ споживачів електроенергії. Струм більшості споживачів електроенергії має активно-індуктивний характер. Вмикаючи паралельно споживачам батареї конденсаторів, розвантажують джерела енергії і лінію від реактивного струму. Індуктивний струм споживачів компенсується ємнісним струмом конденсаторів. У результаті за допомогою компенсації досягають значень $\cos\varphi = 0.85 \div 0.95$. Це дає значний економічний ефект внаслідок розвантаження проводів, зниження втрат, економії матеріалів і електроенергії.

ЛЕКЦІЯ 6

6.1. ТРИФАЗНИЙ СТРУМ

У системі виробництва і споживання електроенергії велике поширення одержала *трифазна система* змінного струму. Вона забезпечує економічну передачу енергії, дозволяє створювати і використовувати надійні в роботі й прості за влаштуванням електродвигуни, генератори і трансформатори.

Трифазна система являє собою сукупність трьох електричних кіл змінного струму однієї частоти, ЕРС яких зсунуті за фазою на $1/3$ періоду.

Звичайно амплітуди цих ЕРС рівні, тобто система симетрична. На рис. 6.1, а дана часова діаграма таких ЕРС: e_A , e_B , e_C ; на рис. 6.1, б – їхня векторна діаграма.

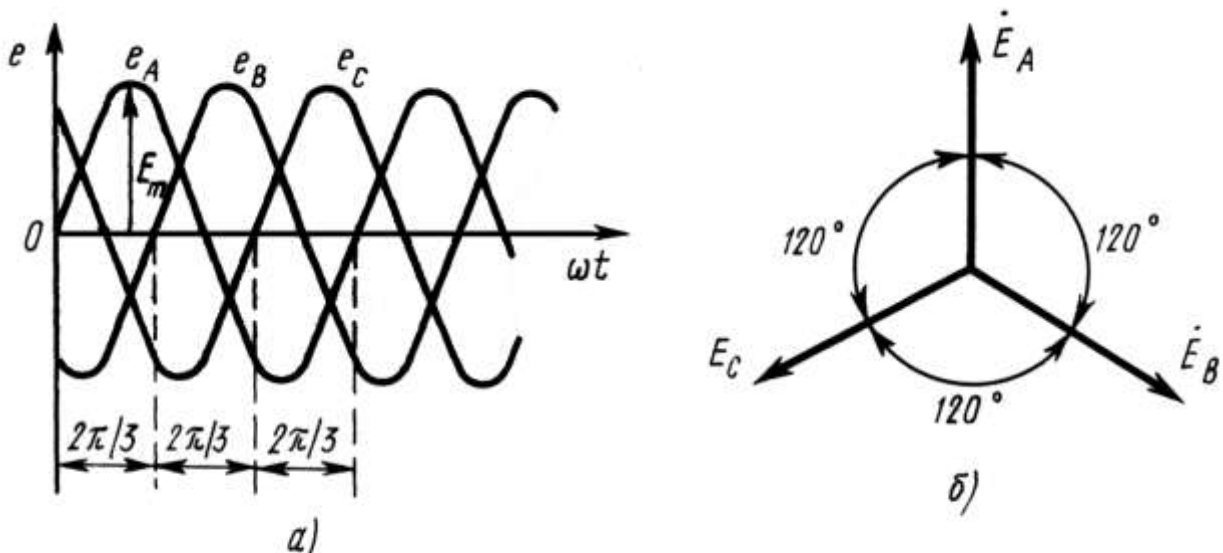
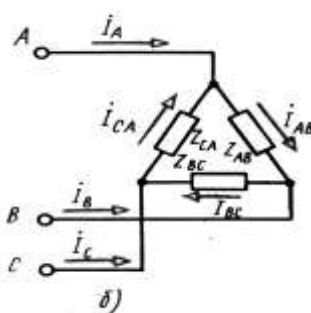
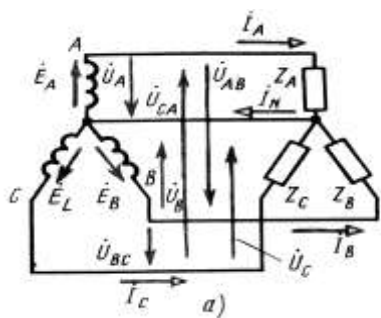


Рис. 6.1—Графік миттєвих значень трифазної системи ЕРС (а) і векторна діаграма (б)

Кожне окреме коло трифазної системи називають *фазою*. Електроспоживачі



й обмотки джерел енергії у трифазних системах можуть бути з'єднані *зіркою* або *трикутником* (рис. 6.2).

Рис. 6.2—Схеми з'єднань трифазних кіл

З'єднання приймачів

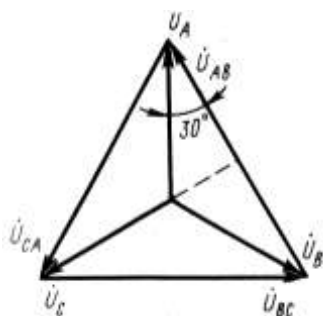


Рис. 6.3—Векторна діаграма напруг при з'єднанні приймача енергії в зірку

зіркою. При з'єднанні фаз приймачів зіркою напруги на їхніх затискачах називають *фазними* U_ϕ (U_A , U_B , U_C), а напруги між лінійними проводами — *лінійними* U_Δ (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}). На рис. 6.2, а зазначені лінійні й фазні напруги, а на рис. 6.3 побудована векторна діаграма для симетричної системи живильних напруг.

Співвідношення між векторами фазних і лінійних напруг такі:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \quad (6.1)$$

Для симетричної системи

$$U_\Delta = \sqrt{3}U_\phi. \quad (6.2)$$

При з'єднанні приймачів зіркою трифазна система буває *чотирипровідною* (так вмикають освітлювальні й побутові прилади, однофазні двигуни і т.д.) або *трипровідною* (трифазні двигуни, індукційні печі та ін.).

Для чотирипровідної системи (рис. 6.2, а), де приймачі включені між нейтральним проводом і кожним з лінійних проводів, можна записати:

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}; \quad (6.3)$$

$$I_A = U_A/Z_A; I_B = U_B/Z_B; I_C = U_C/Z_C; \quad (6.4)$$

$$\cos\varphi_A = R_A/Z_A; \cos\varphi_B = R_B/Z_B; \cos\varphi_C = R_C/Z_C; \quad (6.5)$$

Миттєве значення струму в нейтральному проводі

$$i_N = i_A + i_B + i_C. \quad (6.6)$$

Діюче значення струму в нейтральному проводі характеризується геометричним додаванням векторів фазних струмів:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (6.7)$$

Навантаження всіх трьох фаз називається *симетричним*, якщо струм у них однаковий і рівні зсуви фаз між фазними напругами і струмами.

При симетричному навантаженні сума векторів фазних струмів утворює замкнутий трикутник. Отже струм у нейтральному проводі дорівнює нулю. З цієї причини для симетричного трифазного навантаження (наприклад, трифазного двигуна) нейтральний провід не потрібний.

Розрахунок симетричної трифазної системи при рівномірному навантаженні зводиться до розрахунку однієї фази незалежно від наявності нейтрального проводу. У цьому випадку фазна напруга

$$U_A = U_B = U_C = U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3},$$

фазний струм

$$I_A = I_B = I_C = I_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} / Z_{\text{ф}},$$

косинус кута зсуву фаз струму і напруги

$$\cos\varphi = R_{\text{ф}} / Z_{\text{ф}},$$

активна, реактивна і повна потужність відповідно:

$$P = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos\varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos\varphi;$$

$$Q = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \sin\varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi;$$

$$S = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}}.$$

При несиметричній системі напруг або при нерівномірному навантаженні фаз потужності визначаються окремо для кожної фази.

З'єднання приймачів трикутником. При з'єднанні приймачів енергії трикутником (рис. 6.2, б) їхні фази приєднують до лінійних проводів, що йдуть від джерела електроенергії. Струм у кожному з лінійних проводів дорівнює різниці фазних струмів (за позитивні напрямки струмів тут, як і раніше, приймають напрямком від генератора до приймача). Це справедливо як для миттєвих, так і для діючих значень струмів, що знаходять як геометричну різницю векторів відповідних фазних струмів (рис. 6.4):

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.$$

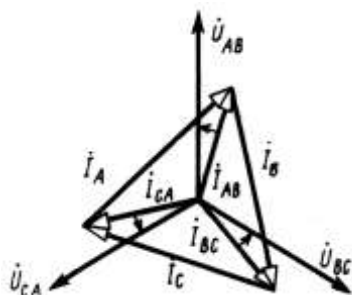


Рис.6.4—Векторна діаграма напруг і струмів симетричного приймача, з'єданого трикутником

Якщо система лінійних напруг *симетрична*, тобто $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\phi} = U_{\text{л}}$, навантаження фаз рівномірне, тобто $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$ і $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_{\phi}$, то й діючі значення фазних струмів рівні між собою, мають однаковий фазовий зсув φ_{ϕ} щодо відповідних напруг і на 120° один відносно іншого. У цьому разі

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\phi}; \cos \varphi_{\phi} = R_{\phi} / Z_{\phi};$$

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi; Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi; S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}.$$

6.2. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І ТРАНСФОРМАТОРИ

В електричних машинах і трансформаторах відбувається перетворення електроенергії. У генераторах механічна енергія перетворюється в електричну, у двигунах відбувається зворотне перетворення; трансформатори перетворюють змінний струм однієї напруги в змінний струм іншої напруги.

Електричні машини мають властивість оборотності: кожний генератор може працювати як двигун і навпаки. Однак кожна конкретна машина звичайно призначається для одного режиму роботи: як генератор або як двигун. У кожному трансформаторі перетворення енергії також може бути змінене на зворотне.

Високі енергетичні показники, зручність підведення і відбору енергії, можливість виконання машин найрізноманітнішої потужності, швидкості обертання, а також зручність обслуговування і простота керування зумовили широке розповсюдження електричних машин.

Трансформатори використовують у системах передачі й розподілу електроенергії, а також для одержання різних рівнів напруги на виробництві й у побуті. Їхнє застосування забезпечує економічну передачу електроенергії до споживачів (передачу ведуть при підвищеній напрузі, що дозволяє зменшити переріз проводів ліній електропередач і втрати потужності в них).

Корисна потужність, на яку розрахована електрична машина, називається номінальною. Всі інші величини, що характеризують роботу машини при цій потужності, також називаються номінальними. Ці величини вказують у паспорті машини. Для трансформаторів указують не корисну, а повну номінальну потужність.

6.2.1. ТРАНСФОРМАТОРИ

Будова. Звичайно трансформатор складається зі сталевого замкнутого *магнітопровода* і двох або декількох індуктивно зв'язаних між собою *обмоток*. Магнітопровід необхідний для посилення електромагнітного зв'язку між обмотками. Магнітопровід трансформатора складається зі стержнів, на яких розміщені обмотки, а також верхнього і нижнього ярма.

Для зменшення втрат від вихрових струмів магнітопровід збирають із листів електротехнічної сталі товщиною 0.35 або 0.5 мм. Листи ізолюють один від одного лаком, тонким папером або шаром окалини. Листи звичайно збирають «внакладку», тобто з перекриттям зазорів. Це дозволяє забезпечити високу магнітну провідність магнітопровода й обмежити шляхи для проходження вихрових струмів. Листи магнітопровода стягують болтами, пропущеними через ізольовані втулки.

У системі електропостачання в основному використовують *масляні трансформатори*. У них магнітопровід з обмотками вміщують у бак з трансформатор-

ним маслом. Просочення маслом підвищує електричну міцність ізоляції, а його циркуляція поліпшує охолодження обмоток і магнітопровода. Збільшують охолоджувану поверхню трансформаторів використанням трубчастих радіаторів.

У громадських і виробничих приміщеннях за умовами пожежної безпеки банки трансформаторів заповнюють негорючою рідиною (соволом, совтолом) або використовують *сухі трансформатори з повітряним охолодженням*. Вони розраховані на менші потужності, ніж масляні, і випускаються на напруги до 10 кВ.

Обмотки трансформаторів найчастіше виконують у вигляді циліндричних котушок з мідних або алюмінієвих ізольованих один від одного проводів круг-

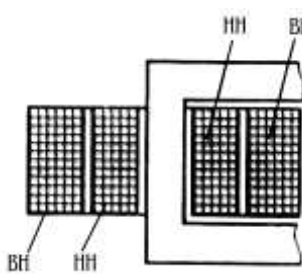


Рис. 6.5—Розташування обмоток трифазного силового трансформатора

лого або прямокутного перерізу. Для кращого магнітного зв'язку їх розташовують концентрично одна на одній, як це показано на рис. 6.5. У силових трансформаторів ближче до стержня звичайно розташована обмотка *нижчої напруги НН*, а обмотка *вищої напруги ВН* – зовні.

Принцип дії. Дія трансформатора заснована на явищі взаємної індукції. Розглянемо *двохобмоточний*

однофазний трансформатор (рис. 6.6). У ньому є індуктивно зв'язані обмотки:

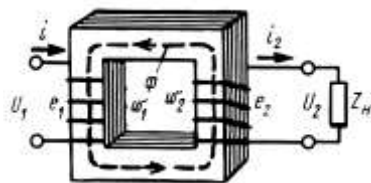


Рис. 6.6—Електромагнітна схема двухобмоточного трансформатора

первинна ω_1 і вторинна ω_2 . Якщо первинну обмотку підключити до джерела змінної напруги U_1 , то по ній протікатиме струм i , що збудить в осерді трансформатора змінний магнітний потік Φ . Цей потік, пронизуючи витки обмоток трансформатора, буде індукувати у них ЕРС e_1 і e_2 . Якщо вторинну обмотку замкнути на який-небудь приймач енергії з опором $Z_{\text{н}}$, то по цій обмотці і через приймач протікатиме струм i_2 .

У такий спосіб електрична енергія, трансформуючись, передається з первинного кола у вторинне.

ЕРС в обмотках. Миттєві значення ЕРС, індукованих в обмотках трансформатора, визначаються виразами

$$e_1 = -\omega_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad e_2 = -\omega_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (6.8)$$

Діючи значення цих ЕРС при синусоїдальній зміні магнітного потоку Φ

$$E_1 \approx 4.44 \omega_1 f \Phi_m, \quad E_2 \approx 4.44 \omega_2 f \Phi_m, \quad (6.9)$$

де f – частота мережі, Гц; Φ_m – максимальне значення основного потоку, Вб.

Відношення ЕРС обмоток трансформатора дорівнює відношенню числа витків і називається коефіцієнтом трансформації

$$k_T = E_1 / E_2 = \omega_1 / \omega_2. \quad (6.10)$$

При $k_T > 1$ трансформатор понижуючий, при $k_T < 1$ – підвищувальний. Будь-який трансформатор може бути використаний і як підвищувальний, і як понижувальний.

Режими роботи. У режимі холостого ходу трансформатора коло його вторинної обмотки розімкнуте; до первинного підведена номінальна напруга $U_{1н}$, у ньому протікає невеликий струм холостого ходу I_0 . У цих умовах можна вважати, що $E_1 = U_1$ і $E_2 = U_2$, тому коефіцієнт трансформації і визначають при цьому режимі роботи трансформатора.

Дослідом холостого ходу можна знайти також втрати потужності P_0 у сталі магнітопровода на гістерезис і вихрові струми.

У робочому режимі роботи трансформатора по його обмотках ω_1 і ω_2 проходять струми I_1 і I_2 при напругах на обмотках U_1 і U_2 . У номінальному робочому режимі – номінальні струми $I_{1н}$, $I_{2н}$ при номінальних напругах $U_{1н}$ і $U_{2н}$.

Нехтуючи спадом напруги в первинній обмотці трансформатора, можна вважати $U_1 \approx E_1$. Тоді при незмінній за значенням напрузі $U_1 = U_{1н}$ при будь-якому навантаженні трансформатора ЕРС E_1 постійна. Оскільки ЕРС E_1 залежить від магнітного потоку ($E_1 = 4.44 \omega_1 \Phi f$), то і магнітний потік при будь-якому навантаженні можна вважати постійним.

Струм I_2 , що проходить у вторинній обмотці трансформатора, створює свій магнітний потік, який, відповідно до правила Ленца, спрямований назустріч магнітному потоку первинної обмотки і прагне його зменшити. Щоб результуючий магнітний потік залишався незмінним, магнітний потік вторинної

обмотки повинен бути врівноважений магнітним потоком первинної обмотки. Тому при збільшенні струму I_2 збільшується і струм I_1 . Магнітні потоки, створювані цими струмами, врівноважуються, і результуючий магнітний потік в осерді зберігає практично незмінне значення.

Якщо знехтувати втратами в трансформаторі, то можна вважати рівними потужності трансформатора, споживану з мережі і ту, що віддається споживачеві:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (6.11)$$

Тоді

$$I_2/I_1 = U_1/U_2 = \omega_1/\omega_2 = k_T; I_2 = k_T I_1.$$

У понижуючому трансформаторі $U_1 > U_2$ у k_T раз; $I_1 < I_2$ також у k_T раз. У підвищувальному трансформаторі співвідношення зворотне.

Завантаження трансформатора в робочому режимі оцінюються коефіцієнтом завантаження

$$\beta = \frac{P_2}{S_H \cos\varphi} = \frac{I_2}{I_{2H}}, \quad (6.12)$$

де P_2 – корисна потужність трансформатора; S_H – номінальна повна потужність; $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності навантаження.

У режимі короткого замикання вторинна обмотка трансформатора замкнута накоротко. Слід розрізняти коротке замикання в умовах експлуатації і досліду.

В експлуатаційних умовах коротке замикання – аварійний режим, при якому в трансформаторі протікають великі струми, виділяється велика кількість теплоти і створюються великі механічні зусилля, здатні його зруйнувати. Дослід же короткого замикання роблять при такій первинній напрузі, щоб значення струмів I_1 і I_2 обмоток трансформатора були номінальними. Цю напругу U_K (у відсотках від U_{1H}) вказують на щитку трансформатора поруч з іншими номінальними даними. Вона характеризує значення опорів обмоток трансформатора і використовується при розрахунках спадання напруги при навантаженні і струмі короткого замикання:

$$I_{1K} = I_{1H} \frac{100}{U_K \%}. \quad (6.13)$$

Меншому значенню ЕРС $E_1 \approx U_k$ відповідає менше значення магнітних втрат. Втрати P_k в обмотках, які визначаються у цьому досліді, такі ж самі, як і в номінальному режимі роботи трансформатора, оскільки в обмотках протікають номінальні струми.

Зовнішня характеристика. Зі зміною навантаження трансформатора змінюються струми I_1 і I_2 в його обмотках, спадання напруги в них і напруга U_2 на затискачах вторинної обмотки.

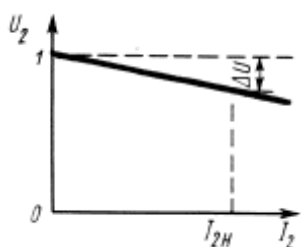


Рис. 6.7– Зовнішня характеристика трансформатора

Залежність $U_2(I)$ називається зовнішньою характеристикою. При звичайному, активно-індуктивному, навантаженні ця характеристика має вигляд похилої прямої, поданої на рис. 6.7, де показана зміна напруги ΔU при номінальному струмі $I_{2н}$.

Втрати і ККД. Перетворення електроенергії в трансформаторах відбувається з високим ККД (до 98–99 % у потужних трансформаторах). Періодичні зміни магнітного поля в магнітопроводі трансформатора супроводжуються втратами в сталі магнітопровода на гістерезис і вихрові струми. Ці втрати залежать від сорту сталі і зростають зі збільшенням частоти, магнітної індукції і маси магнітопровода.

Втрати в сталі не залежать від навантаження і дорівнюють втратам холостого ходу:

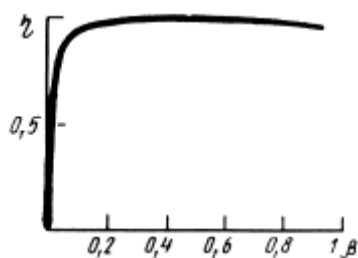


Рис. 6.8–Графік залежності ККД трансформатора від коефіцієнта завантаження $\eta = f(\beta)$

$$\Delta P_{ст} = P_0. \quad (6.14)$$

Протікання струмів по обмотках трансформатора викликає *втрати потужності в обмотках*, пропорційні квадрату коефіцієнта завантаження трансформатора:

$$\Delta P_{об} = \beta^2 P_k, \quad (6.15)$$

де P_k – номінальні втрати в обмотках.

ККД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{ст} + \Delta P_{об}} = \frac{\beta S_H \cos \varphi}{\beta S_H \cos \varphi + P_0 + \beta^2 P_k}. \quad (6.16)$$

На рис. 6.8 показана залежність $\eta = f(\beta)$. Видно, що при початковому навантаженні трансформатора ККД різко зростає, а потім змінюється дуже мало, досягаючи при деякому значенні β максимуму.

Трифазний трансформатор. Для трансформації трифазного струму можна використовувати три однофазних трансформатори (рис. 6.9, а), обмотки яких можуть бути з'єднані за схемою зірки або трикутника. На практиці застосовують *трифазні трансформатори* (рис. 6.9, б) із загальним для всіх фаз магнітопроводом.

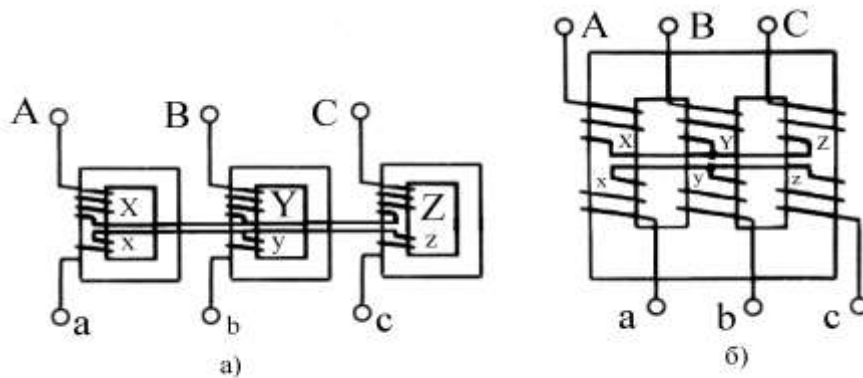


Рис. 6.9—Схеми вмикання трансформаторної групи (а) і трифазного тристержневого трансформатора (б)

Затискачі трифазного трансформатора розрізняють у порядку чергування фаз: *на стороні вищої напруги* затискачі А, В, С – початок обмоток, X, Y, Z – їхні кінці; *на стороні нижчої напруги* – відповідно а, b, c і x, y, z.

Основними способами з'єднання обмоток є з'єднання зіркою і трикутником. З'єднання обох обмоток у зірку є найпростішим і найдешевшим, оскільки кожна з обмоток і її ізоляція (при заземленій нейтралі) повинні бути розраховані *тільки на фазні напруги і лінійний струм*. З'єднання зірка – трикутник застосовують для трансформаторів великої потужності в тих випадках, коли на стороні нижчої напруги не потрібен нейтральний провід.

Відношення лінійних напруг залежить від способу з'єднань обмоток трансформатора. При схемах з'єднання обмоток зірка або трикутник відношення напруг дорівнюють коефіцієнту трансформації; при схемах зірка – трикутник і трикутник – зірка відношення напруг відповідно більше і менше цього коефіцієнта в $\sqrt{3}$ разів.

Автотрансформатори. В автотрансформаторі обмотка нижчої напруги складає частину обмотки вищої напруги (рис. 6.10).

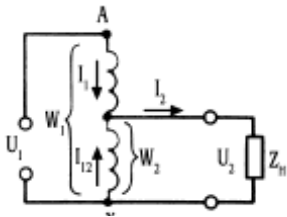


Рис. 6.10. -Принципова схема автотрансформатора

Електроенергія в автотрансформаторах передається не тільки електромагнітним шляхом, але і за рахунок безпосереднього зв'язку обмоток.

Напруги і струми в автотрансформаторі зв'язані тими самими співвідношеннями, як і в звичайному трансформаторі:

$$U_1/U_2 \approx \omega_1/\omega_2 \approx I_2/I_1.$$

Струми I_1 і I_2 протилежні за фазою, тому в загальній частині обмотки ω_2 протікає струм

$$I_{12} = I_2 - I_1. \quad (6.17)$$

Для всієї переданої потужності, яка називається *прохідною*, можна записати:

$$S = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_e + S_p, \quad (6.18)$$

де S_e – потужність, що передається з обмотки ω_1 в обмотку ω_2 завдяки електричному зв'язку; S_p – розрахункова потужність, що передається магнітним шляхом.

Розрахункова потужність визначає розміри магнітопровода, і (через те, що вона складає тільки частину прохідної) при виготовленні автотрансформатора можна використовувати магнітопровід меншого перерізу, ніж при створенні звичайного трансформатора тієї ж потужності. Це дозволяє економити сталь. Крім цього, при виготовленні автотрансформатора заощаджується мідь. Із зменшенням перерізу магнітопровода зменшується середня довжина витка; обмотки мають загальну частину ω_2 , яку можна виконати проводом меншого перерізу, ніж обмотку нижчої напруги звичайного трансформатора тієї ж потужності.

Однак переваги автотрансформатора істотні лише при малих коефіцієнтах трансформації. При зростанні k_T все більше позначається принциповий недолік автотрансформатора – *наявність електричного зв'язку його обмоток*. Через це зростає небезпека ураження струмом осіб, які користуються розподільною мережею. Крім того, обидва кола (первинне і вторинне) мають бути однаково ізолювані відносно землі, що призводить до подорожчання мережі.

Інші типи трансформаторів. В енергетиці застосовують *трьохобмоточні трансформатори* з однією первинною і двома вторинними обмотками або двома первинними й однією вторинною обмоткою.

За номінальну потужність такого трансформатора приймають номінальну потужність найбільш потужної його обмотки.

У пристроях радіотехніки й автоматики часто застосовують *багатообмоточні трансформатори малої потужності* з однією первинною і декількома вторинними обмотками.

У трансформаторах з *плавним регулюванням напруги* застосовують контактні щітки, що ковзають по неізольованій зовнішній поверхні вторинної обмотки, внаслідок чого змінюється число витків, які включаються в роботу.

Використовують також трансформатори з *рухомою вторинною обмоткою*, з *підмагнічуванням магнітопроводу постійним струмом* та ін.

Зварювальні трансформатори – це однофазні трансформатори з вторинною напругою на холостому ході, рівною 60–75 В. *При роботі такого трансформатора коротке замикання є нормальним експлуатаційним режимом.* Коло зварювального струму трансформатора повинне мати велику індуктивність, для чого послідовно з вторинною обмоткою включають дросель. Завдяки цьому обмежується струм короткого замикання.

У *випрямних трансформаторах* у коло вторинних обмоток включені електричні вентиля, що пропускають струм в одному напрямку. Несинусоїдальність струмів обмоток таких трансформаторів і додаткове підмагнічування магнітопровода в однонапівперіодних схемах випрямлення приводять до збільшення габаритних розмірів і маси трансформаторів у порівнянні з трансформаторами, які працюють на синусоїдальних струмах.

У пристроях автоматики, електроніки, зв'язку широко використовують *імпульсні трансформатори*, що служать для передачі імпульсних сигналів малої тривалості. Основна вимога, що ставиться до цих трансформаторів, – мінімальне спотворення сигналу, яке забезпечується зменшеним значенням індукції в магнітопроводі і застосуванням для нього магнітних матеріалів з високими магнітними властивостями (на високих частотах). Так само, як і у *високочастотних трансформаторах*, тут використовують магнітопроводи з тонких листів високоякісної електротехнічної сталі, залізонікелевих сплавів, магнітодіелектриків і феритів.

Для підключення електровимірювальних приладів до кіл із великими струмами і напругами використовують *вимірювальні трансформатори струму і напруги*.

ЛЕКЦІЯ 7

7.1. АСИНХРОННІ МАШИНИ

Асинхронні машини найчастіше використовують як *двигуни*. Найбільше застосовують *трифазні асинхронні двигуни*. Їх використовують для приводу верстатів, насосів, вентиляторів, вантажопідйомних механізмів і в багатьох інших випадках.

Асинхронні двигуни бувають від десятків ват до декількох мегават, при напругах обмотки статора до 10 кВ.

Асинхронні двигуни – найбільш розповсюджені на виробництві й у побуті.

Недоліком асинхронних двигунів є труднощі, пов'язані з регулюванням частоти обертання. Крім того, ці двигуни мають відносно низький $\cos\varphi$ (0.85–0.9 при повному навантаженні; і 0.2–0.3 на холостому ході). Розглянемо трифазний асинхронний двигун.

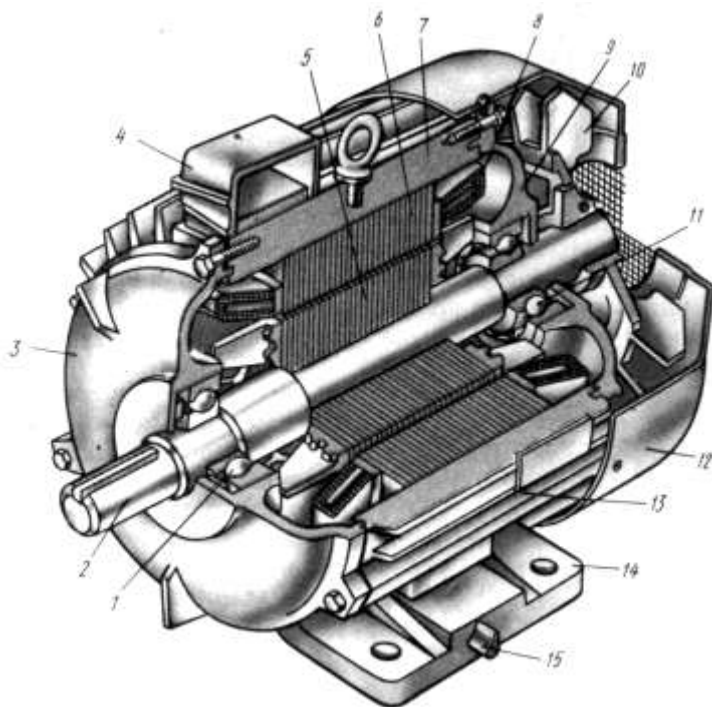


Рис. 7.1–Будова трифазного асинхронного двигуна.

1, 11 – підшипники, 2 – вал, 3, 9 – підшипникові щити,
4 – коробка виводів, 5 – сердечник ротора, 6 – сердечник статора,
7 – корпус статора, 8 – обмотка статора, 10 – вентилятор,
12 – кожух, 13 – ребра, 14 – лапи, 15 – болт заземлення

Будова. Двигун (рис. 7.1) складається з нерухомої (*статора*) і обертової (*ротора*) частин. Основними деталями статора є корпус 7 і осердя 6 з обмоткою 8. Корпус відливають з алюмінію (для малопотужних двигунів) або з чавуну. Ребра 13 на зовнішній частині корпуса збільшують площу поверхні охолодження. Осердя статора зібране з листів електротехнічної сталі, покритих лаком. Ротор складається із шихтованого осердя 5 з обмоткою і вала 2. Вал ротора обертається в під-

шипниках кочення *1* і *11*, розташованих у підшипникових щитах *3* і *9*.

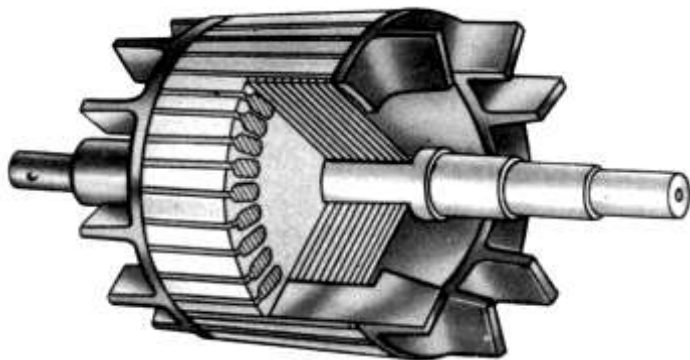
Двигун охолоджують обдуванням зовнішньої поверхні корпуса. Потік повітря створюється відцентровим вентилятором *10*, прикритим кожухом *12*.

Кінці обмоток статора приєднані до затискачів коробки виводів *4*; для кріплення двигуна використовують лапи *14*, для заземлення – болт *15*.

На внутрішній стороні пустотілого циліндра осердя статора є пази, в які закладають статорну обмотку. У трифазного двигуна вона трифазна і число її котушок в цьому разі кратне трьом (3, 6, 9 і т.д.)

Залежно від конструкції обмотки ротора розрізняють асинхронні двигуни з короткозамкнутим і фазним роторами.

Трифазний асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором найбільш простий, надійний у роботі і дешевий. Обмотку ротора такого двигуна звичайно конують з алюмінієвих стержнів, які заливають без ізоляції в пази. Одночасно з торців відливають короткозамикаючі кільця з лопатками вентилятора для



ого охолодження. На рис. 7.2 жений короткозамкнутий ротор (з розрізом). У потужних машинах ($P_H > 100$ кВт) для роторної обмотки користуються мідні стержні і замикаючі кільця.

Рис.7.2–Короткозамкнутий ротор

У пазах ротора двигуна з фазним ротором укладають обмотку, подібну до обмотки статора. Фазні обмотки ротора з'єднують у зірку, а три її виводи приєднують до трьох контактних кілець, насаджених на вал та ізольованих одне від одного і від вала. Щітками, накладеними на кільця, обмотка ротора може бути замкнута накоротко або на опір. Двигуни з фазним ротором складніші, дорожчі і менш надійні в експлуатації, ніж з короткозамкнутим, але мають кращі пускові й регульовальні властивості.

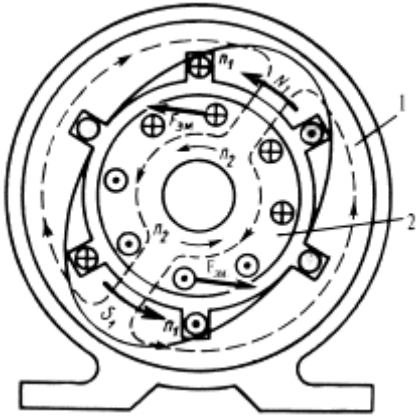


Рис. 7.3—До принципу дії асинхронного двигуна

Принцип дії. Осердя статора 1 і ротора 2 утворюють магнітне коло асинхронної машини (рис. 7.3). При проходженні трифазного струму по трифазній обмотці статора створюється обертове магнітне поле частотою

$$n_1 = 60f / p, \text{ або } \omega_1 = 2\pi f / p \approx n_1 / 9.55, \quad (7.1)$$

де f – частота живильної мережі; p – число пар полюсів на фазу.

При $f = 50$ Гц для двигунів із числом полюсів обмотки статора $2p = 2, 4, 6, 8, 10$ синхронна частота обертання відповідно дорівнює 3000, 1500, 1000, 750, 600 об/хв.

Це поле (показане пунктиром) перетинає провідники обмотки ротора і наводить у них ЕРС E_2 . Під дією ЕРС у замкнутій обмотці ротора виникає струм I_2 . На кожен провідник обмотки ротора, який пересікає магнітне поле, діє електромагнітна сила $F_{ем}$. Сили, що діють на всі провідники обмотки ротора, створюють обертовий момент, що захоплює ротор услід за полем. Ротор двигуна обертається з асинхронною швидкістю n_2 , меншою, ніж синхронна швидкість обертання поля n_1 . Різниця швидкостей обертання поля і ротора характеризується ковзанням S , яке часто виражається у відсотках:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%. \quad (7.2)$$

У номінальному режимі роботи двигуна ковзання S звичайно невелике (2–6 %). Якщо ротор нерухомий ($n_2 = 0$), то $S = 100$ %.

Наявність різниці швидкостей n_1 і n_2 принципово необхідна (у двигуні), тому що тільки при цьому магнітне поле перетинає провідники ротора, у них наводиться ЕРС, виникають струми, створюється електромагнітний обертовий момент.

Для зміни напрямку обертання ротора, тобто для реверсування двигуна необхідно змінити напрямок обертання магнітного поля, створюваного обмоткою статора. Це досягають переключенням двох фаз, тобто двох із трьох проводів, що з'єднують обмотку статора з мережею.

Механічна характеристика. Механічна характеристика – це залежність, що показує, як змінюється частота обертання ротора при зміні моменту на валу двигуна.

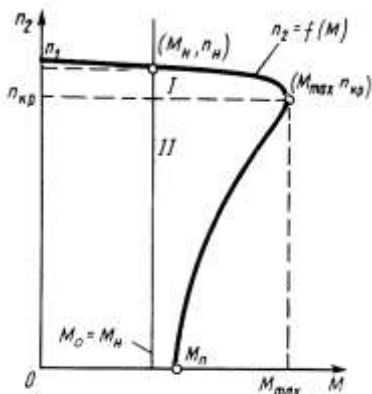


Рис. 7.4–Механічна характеристика асинхронного двигуна

На рис. 7.4 представлена механічна характеристика $n_2 = f(M)$ асинхронного двигуна. Її характерні точки: $0, n_1$ – ідеальний холостий хід; $M_{max}, n_{кр}$ – максимальний момент, критична частота обертання; M_n – пусковий момент. Точкою M_{max} крива поділяється на дві області: *I* – область усталеної роботи, де знаходиться точка номінального режиму (M_n, n_n) ; *II* – область нестійкого режиму, яка використовується при

пуску або вимушеній зупинці двигуна.

Двигун у загальному випадку переборює деякий момент опору M_0 з боку механізму. Залежність моменту M_0 від частоти обертання двигуна для різних механізмів різна. Розглянемо найбільш простий випадок, коли момент M_0 не залежить від частоти. При ввімкненні двигуна його пусковий момент більший моменту опору (рис. 7.4) і ротор набуває прискорення. Швидкість зростає доти, доки не установиться рівність моментів двигуна й опору; при $M_0 = M_n$ ротор обертається з номінальною частотою n_n .

При збільшенні моменту M_0 новий стійкий стан настає при новому меншому значенні n_2 ; при зменшенні M_0 – при більшому значенні n_2 . На холостому ході частота обертання ротора близька до синхронної; якщо M_0 стане більшим, ніж M_{max} , то двигун зупиниться.

Обертаний момент двигуна пропорційний квадрату напруги живильної мережі.

Якщо напруга в мережі знизилася, наприклад, на 10%, то значення M_{max} і M_n знизяться на 19%. Значення $n_{кр}$ при зниженні напруги залишається постійним (рис. 7.5, а).

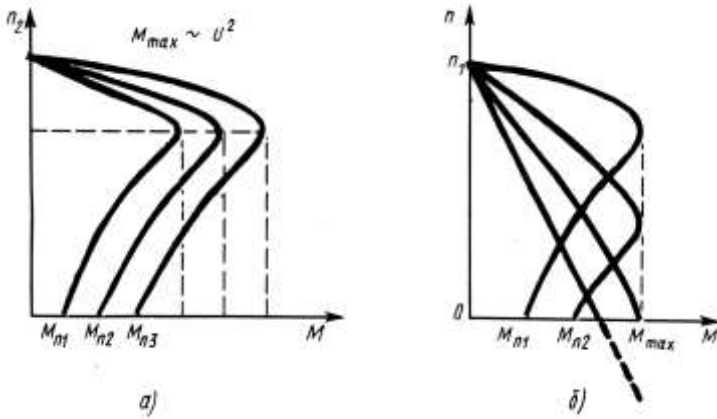


Рис. 7.5—Вплив на механічну характеристику асинхронного двигуна: а) напруги мережі; б) опору в колі ротора

(рис. 7.5, б), тим «м'якшою» стає механічна характеристика. При зміні $R_{\text{дод}}$ значення M_{max} зберігається постійним. Можна підібрати такий $R_{\text{дод}}$, щоб пусковий момент мав максимальне значення.

Пуск двигуна з короткозамкнутим ротором. Для двигунів з короткозамкнутим ротором звичайно застосовують пряме включення в мережу обмоток статора C_1, C_2, C_3 (рис. 7.6, а) за допомогою відповідної комутаційної апаратури.

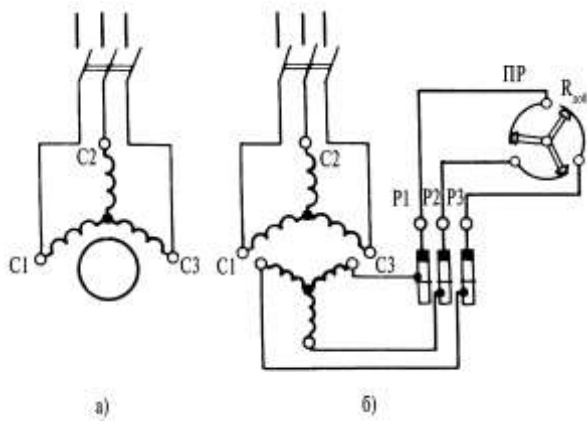


Рис. 7.6—Схема вмикання трифазних асинхронних двигунів з коротко-замкнутим (а) і з фазним (б) роторами

Короткочасний поштовх пускового струму ($I_{\text{п}} = (4 \div 7) I_{\text{н}}$) безпечний для двигуна, але може бути причиною надмірно великого спадання напруги в мережі при недостатній потужності джерела енергії (як правило, трансформатора). У цих випадках обмежують пусковий струм пуском двигуна при зниженій напрузі.

Напругу в момент пуску двигуна знижують: використовуючи на період пуску з'єднання обмотки статора в зірку з наступним переключенням її на трикутник; вмикаючи в коло обмотки статора на період пуску додаткові активні або реактивні опори (реактори); підключаючи двигун до мережі через понижуючий автотрансформатор.

Спільний недолік усіх цих способів – значне зменшення пускового і максимального моментів двигуна, пропорційних квадрату прикладеної напруги.

Пуск двигуна з фазним ротором. Хороші пускові характеристики має двигун з фазним ротором. Для зниження пускового струму обмотки $P1, P2, P3$ ротора при пуску замикають на активний опір $R_{\text{дод}}$ пускового реостата $ПР$ (рис. 7.6, б). При цьому зменшується струм ротора, а отже, і струм статора. У той же час активна складова струму ротора збільшується, підвищуючи пусковий момент. У пусковому реостаті звичайно є декілька ступенів, що послідовно виводяться під час пуску аж до замикання обмотки ротора накоротко. Тривала робота з додатковим опором у колі ротора неекономічна внаслідок значних втрат.

Регулювання частоти обертання. Частота обертання ротора асинхронного двигуна визначається швидкістю обертання магнітного поля:

$$n_1 = 60f / p. \quad (7.3)$$

Для ступінчастої зміни частоти обертання застосовують спеціальні дво-, три- і чотиришвидкісні двигуни. На їхньому статорі розміщують обмотки з різним числом полюсів.

Крім того, можна використовувати *переключення фазних обмоток статора* з послідовного з'єднання (рис. 7.7, а) на паралельне (рис. 7.7, б). При цьому число полюсів зменшується і відповідно збільшується n_1 .

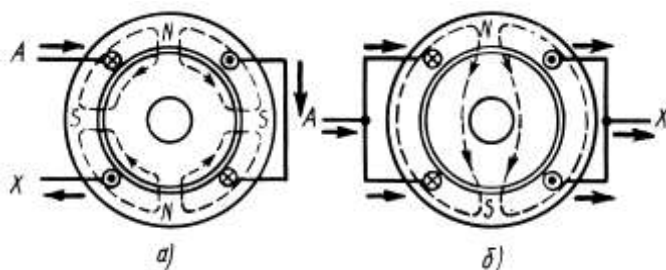


Рис. 7.7–Зміна числа полюсів магнітного поля при ввімкненні фази статорної обмотки послідовно (а) і паралельно(б)

Для плавного регулювання частоти обертання застосовують тиристорні перетворювачі частоти, які живлять двигуни електричним струмом з регульованою частотою.

У двигунах із фазним ротором для регулювання швидкості переключують ступені реостата, ввімкненого в коло ротора. Двигуни працюють у цих режимах порівняно короткочасно.

Гальмування. При експлуатації двигунів нерідко виникає необхідність їхнього *гальмування* (швидкий перехід від одного режиму до іншого, точна зупинка та ін.).

Гальмування двигуна може бути механічним і електричним.

При механічному гальмуванні електромагніт або пружини впливають через гальмові колодки на шків, закріплений на валу двигуна.

При електричному гальмуванні використовують *режим противмикання*, коли в працюючому двигуні переключенням двох фаз змінюється напрямок обертання поля, або *режим динамічного гальмування*, коли після відключення двигуна від мережі в обмотку статора короткочасно подається постійний струм.

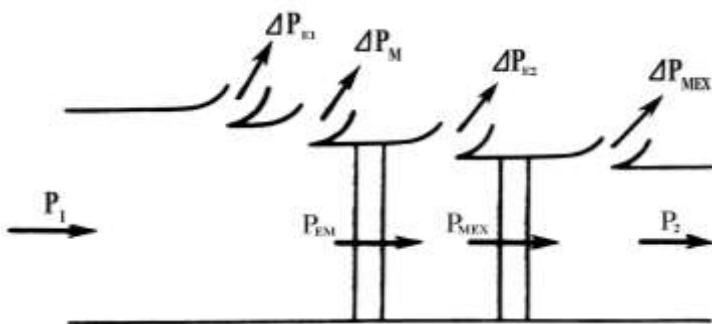


Рис. 7.8– Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Енергетична діаграма.

Розподіл потужності, що споживається двигуном, ілюструється енергетичною діаграмою (рис. 7.8). Нехай трифазний

асинхронний двигун одержує від мережі потужність $P_1 = \sqrt{3} UI \cos\varphi$. Частина цієї потужності до перетворення в електромагнітну потужність $P_{ем}$ обертового поля втрачається в обмотці статора (втрати ΔP_{e1}), на гістерезис і вихрові струми (магнітні втрати ΔP_m). Потужність обертового магнітного поля $P_{мех} = M\omega_1$ і повна механічна потужність двигуна $P_{мех} = M\omega_2$ розрізняються за рахунок втрат в обмотці ротора:

$$\Delta P_{e2} = P_{ем} - P_{мех} = M(\omega_1 - \omega_2). \quad (7.4)$$

Зважаючи на те, що ковзання $S = (\omega_1 - \omega_2)/\omega_1$, маємо $\Delta P_{e2} = P_{ем} \cdot S$.

Чим більше ковзання, тим більші втрати в роторі. Тому двигуни розраховують так, щоб при нормальній роботі ковзання було невелике. Звичайно $S = 0.02 \div 0.06$.

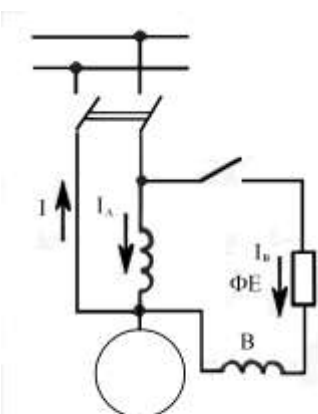


Рис. 7.9–Схема однофазного асинхронного двигуна з пусковою обмоткою

Корисна потужність P_2 на валу менша, ніж

$P_{\text{мех}}$, за рахунок механічних втрат $\Delta P_{\text{мех}}$ у двигуні (тертя в підшипниках, втрати на вентиляцію та ін.). Характер залежності ККД двигуна від завантаження приблизно такий саме, як і в трансформаторів, але його максимальні значення нижчі і складають 0.64–0.95. Більші значення ККД відповідають більш потужним двигунам.

В однофазних асинхронних двигунах потужністю до 1–2 кВт на статорі є дві обмотки (рис. 7.9): робоча A і пускова B , зсунуті на половину полюсного поділу (90 ел. град). Обидві обмотки живляться від мережі однофазного струму. Для створення обертового магнітного поля через пускову обмотку повинен проходити струм I_B зі зсувом по фазі на 90° стосовно струму I_A робочої обмотки. Це досягається ввімкненням у коло пускової обмотки *фазозсувного елемента* ФЕ: активного опору або ємності.

Після запуску двигуна пускова обмотка відключається. Рух підтримується пульсуючим полем робочої обмотки.

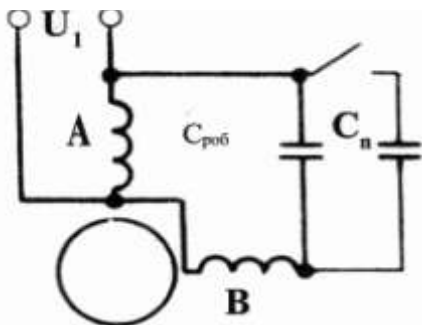


Рис. 7.10—Схема асинхронного конденсаторного двигуна

У конденсаторному двигуні (рис. 7.10) під час роботи ввімкнені обидві обмотки - A і B . Необхідний зсув за фазою між струмами створюється ввімкненням послідовно з однією з них робочої ємності $C_{\text{роб}}$, причому при пуску бажано мати більшу ємність, що досягається включенням C_n . Після розгону і зниження струму пускову ємність відключають, що дозволяє поліпшити умови роботи двигуна в номінальному режимі.

Потужності конденсаторних двигунів невеликі (до 1.5 кВт).

Асинхронні двигуни невеликої потужності (до 600 Вт) застосовують в автоматичних пристроях і електропобутових приладах. Звичайно використовують *однофазні мікродвигуни*. Для цих двигунів характерні підвищений (у порівнянні зі звичайними двигунами) опір обмотки ротора і, відповідно, робота з підвищеним ковзанням.

У пристроях автоматики використовують асинхронні виконавчі двигуни й асинхронні тахогенератори.

Виконавчі двигуни служать для перетворення електричного сигналу в механічне переміщення вала. Частота обертання таких двигунів повинна плавно змінюватися під впливом сигналу керування. Виконавчі двигуни не допускають самоходу (при знятті сигналу керування ротор зупиняється), мають лінійні механічні і регульовальні характеристики, високу швидкодію, безшумні.

Асинхронні тахогенератори перетворюють механічне обертання в електричний сигнал. Їх застосовують для виміру частоти обертання, вироблення сигналів управління, виконання операцій диференціювання й інтегрування в схемах лічильно-обчислювальних пристроїв.

Лінійні асинхронні двигуни застосовують у тих випадках, коли потрібне лінійне переміщення рухомої частини виконавчого пристрою. Їхній принцип дії заснований на здатності багатозазної системи струмів створювати біжуче магнітне поле. Таке поле створюється струмами трифазної обмотки, покладеної в прямолінійний статор. Паралельно статору розташовують рухому частину двигуна – магнітопровід, у пази якого закладені алюмінієві або мідні стержні короткозамкнутої обмотки.

Взаємодія біжучого магнітного поля зі *струмами*, які наводяться в цій обмотці, створює електромагнітні *сили*, що захоплюють рухому частину двигуна за собою.

Рухомою частиною такого двигуна може бути *електропровідна рідина* (рідкі метали, електроліти), що заповнює канал між двома статорами з трифазною обмоткою. Такі пристрої називаються *магнітогідродинамічними насосами*.

Використання лінійних двигунів дозволяє виключити в механічних пристроях кінематичні ланки для перетворення обертового руху в поступальний.

7.2. СИНХРОННІ МАШИНИ

Синхронні машини використовують як *генератори* і як *двигуни*. Майже всі генератори змінного струму – це синхронні машини. Синхронні двигуни за-

стосовують рідше асинхронних і тільки в тих випадках, коли при заданих потужності і режимі роботи вони виявляються більш економічними, ніж асинхронні, або коли потрібен привод з *абсолютно жорсткою механічною характеристикою*.

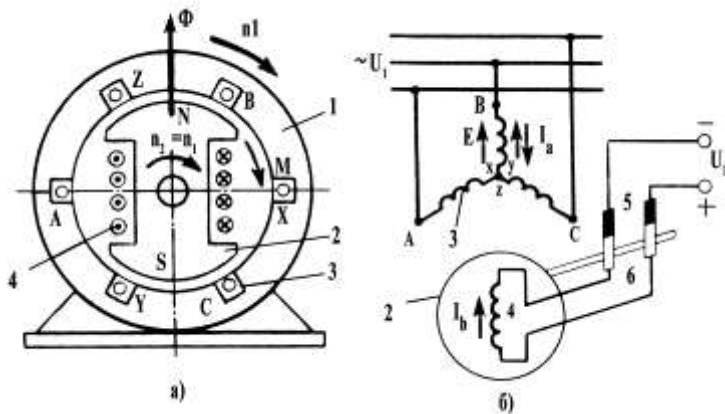


Рис. 7.11—Електромагнітна схема синхронної машини (а) і схема її ввімкнення (б).
1 – статор, 2 – ротор, 3 – обмотка статора, 4 – обмотка збудження

Будова. Побудова і ввімкнення синхронної машини показані на рис. 7.11. У пазах статора 1 машини подібно до того, як це зроблено в асинхронному двигуні, покладена трифазна силова обмотка 3. Початок фазних обмоток позначений *A, B, C*; кінці – *X, Y, Z*. На роторі 2

розміщена обмотка збудження 4. Вона з'єднана через кільця 6 і щітки 5 із джерелом постійного струму. Потужність, необхідна для збудження, складає 0.3–3 % від номінальної потужності синхронної машини.

Принцип дії синхронного генератора. Постійний магнітний потік, створюваний струмом ротора, замикається через сталь ротора, повітряні зазори і осердя статора. Якщо ротор обертається, то створюється обертове магнітне поле. Перетинаючи провідники фазних обмоток статора, це поле наводить у них змінну ЕРС *E*. Частота обертання ротора n_2 підтримується постійною, тому змінна ЕРС у часі визначається тільки розподілом магнітної індукції уздовж окружності ротора. Цей розподіл має *синусоїдальний характер*, тому й у фазних обмотках статора індукуються синусоїдальні ЕРС, зсунуті по фазі одна щодо одної на одну третину періоду (120 ел. град). Якщо на роторі p пар полюсів, то за один його оберт p раз змінюється ЕРС і частота цієї зміни $f = pn_2/60$. Для одержання частоти 50 Гц двополюсний генератор ($p = 1$) повинен робити 3000 об/хв. При підключенні обмотки статора до *трифазного навантаження* струм, що по ній протікає, створює обертове магнітне поле з частотою обертання n_1 , яка дорівнює частоті обертання ротора n_2 .

Сумарне магнітне поле обертається з тією самою частотою, з якою обертається ротор. Тому машина називається синхронною.

Магнітне поле струмів статора, нерухоме щодо обертового ротора, взаємодіючи з постійним струмом ротора, створює електромагнітний гальмовий момент M , що повинен бути урівноважений обертаючим моментом первинного двигуна. Чим більше активна складова струму статора I_a , тим більша потужність перетворена в машині, тобто електромагнітна потужність P_{em} генератора:

$$P_{em} = 3EI_a = M\omega, \quad (7.5)$$

де $\omega = 2\pi n_1/60$, E – ЕРС фази обмотки статора.

Ротор синхронної машини може бути явнополюсним і неявнополюсним.

Явнополюсний ротор (рис. 7.12, а) використовують у машинах з чотирма і більше кількістю полюсів. Осердя 1 роблять або масивними зі сталевих поковок, або набирають з

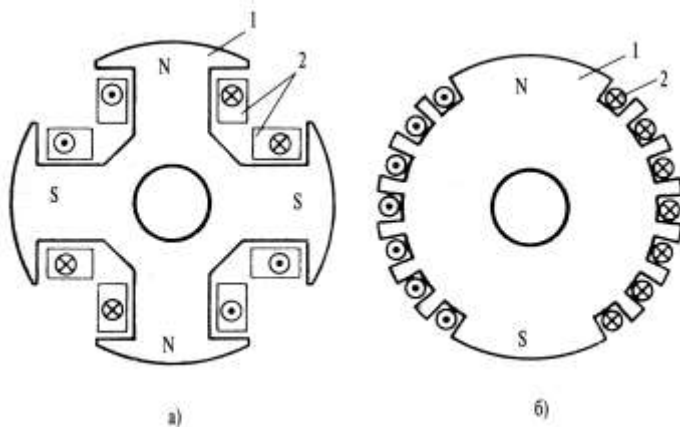


Рис.7.12—Явнополюсний (а) і неявнополюсний (б) ротори синхронної машини.
1 – осердя, 2 – обмотка збудження

листів електротехнічної сталі. Їх кріплять до втулки вала або (при великому числі полюсів) до ободу хрестовини. Обмотки збудження 2 виконують у вигляді циліндричних котушок зі штабової міді, які закріплюють на осердя полюсів.

Машини, які працюють з частотою обертання ротора 1500 і 3000 об/хв, виготовляють з неявнополюсним ротором (рис. 7.12, б), інакше неможливо забезпечити механічну міцність кріплення полюсів 1 і обмотки збудження 2. Обмотку збудження розміщують у пазах осердя ротора, виконаного з масивної сталевий поковки.

Синхронні генератори підрозділяються на турбо-, гідро- і дизель-генератори.

Турбогенератори приводяться в обертання швидкохідними паровими або газовими турбінами і виконуються неявнополюсними. Вал у них розташований

горизонтально. Діаметр ротора за умовами механічної міцності обмежений розмірами 1–1.5 м. Гранична довжина ротора 7.5–8.5 м; вона обмежена припустимим *прогином* вала. При заданих обмеженнях за рахунок збільшення електромагнітних навантажень і підвищення інтенсивності охолодження (застосування водневого і водяного охолодження) вдалося створити турбогенератори потужністю 800 – 1200 МВт.

Гідрогенератори приводяться в обертання гідравлічними турбінами, частота обертання яких складає 50–500 об/хв. Генератори виконують із великою кількістю полюсів і *явнополюсними* роторами. У гідрогенераторах потужністю більш 500 МВт діаметр ротора перевищує 15 м при висоті близько 2 м. У потужних гідрогенераторах вал розташовують *вертикально*. Турбіна знаходиться під генератором і фланцем з'єднується з його валом.

Дизель-генератори приводяться в обертання двигунами внутрішнього згоряння. Їх ротори *явнополюсні* з *горизонтальним* розташуванням вала. Потужність таких генераторів буває від кількох кіловольт-амперів до кількох мегавольт-амперів при частотах обертання від 100 до 1500 об/хв.

Збудження. Обмотка збудження генератора через кільця і щітки отримує живлення або від *генератора постійного струму* (збуджувача), пов'язаного з ротором синхронного генератора, або від *випрямлячів*, що підключаються до мережі. Для потужних синхронних генераторів застосовують так звану *безщіткову систему збудження*. У цій системі як збуджувач використовують спеціальний синхронний генератор, в якого обмотка статора розташована на роторі машини, а випрямляч укріплений безпосередньо на валу. При цьому в колі обмотки генератора відсутні ковзні контакти, що підвищує надійність системи.

Синхронізація. Синхронні генератори електростанцій працюють зазвичай паралельно з мережею. На час профілактичних оглядів, ремонту або просто на час зменшення навантаження синхронний генератор може бути відключений від мережі. Необхідною умовою включення генератора на паралельну роботу з мережею є його *синхронізація*, тобто досягнення збігу чергування фаз, частот, початкових фаз і значень напруги мережі й генератора. Момент збігу фаз конт-

ролюють *синхроноскопами*. Для включення генераторів на паралельну роботу використовують *автоматичну синхронізацію*, що дозволяє регулювати напруги і частоти так, як це необхідно.

Широке розповсюдження одержав метод самосинхронізації, сутність якого полягає в тому, що генератор включають у мережу незбудженим при частоті обертання ротора, близькій до синхронної. Потім включають струм збудження, і ротор генератора поступово втягується в синхронізм.

Паралельна робота з мережею. Енергетичний стан синхронного генератора характеризується *кутом θ* – кутом повороту осі ротора щодо осі обертового магнітного поля. Чим більше навантаження, тим більший *кут θ* .

Для збільшення активної потужності, яку видає генератор у мережу, слід збільшити момент первинного двигуна (подати більше пари в парову турбіну або води в гідравлічну). Ротор у цьому випадку здобуває деяке прискорення, *кут θ* зростає, збільшується гальмівний момент і встановлюється новий стан рівноваги при новому більшому значенні кута.

При збільшенні збудження генератора зростають ЕРС і струм, який видає генератор у мережу. Але це збільшення відбувається за рахунок *реактивної складової струму*, тобто росте *реактивна потужність*.

Будова і принцип дії синхронного двигуна. Принципова схема побудови трифазного синхронного двигуна така ж, як і генератора (рис. 7.11). Його трифазну статорну обмотку підключають до мережі трифазного змінного струму; в обмотку збудження подають постійний струм.

Частота обертання ротора синхронного двигуна дорівнює частоті обертання магнітного поля, тобто не залежить від навантаження. Інакше кажучи, двигун має абсолютно жорстку механічну характеристику.

При збільшенні навантаження двигуна зростає *кут θ* між осями ротора і поля (у режимі двигуна ротор слідує за полем). Після досягнення максимального (перекидаючого) моменту ротор «*випадає із синхронізму*» і зупиняється.

Пуск синхронного двигуна. Для розгону синхронного двигуна застосовують *асинхронний пуск*. Для цього на роторі виконують спеціальну *коротко-*

замкнуту пускову обмотку: мідні або латунні стержні, закладені в полюсні наконечники і замкнуті накоротко торцевими кільцями. Після розгону ротора до частоти обертання, близької до синхронної, в обмотку збудження подається постійний струм і ротор втягується в синхронізм.

Регулювання реактивної потужності. Достоїнством синхронних двигунів, крім абсолютно жорсткої механічної характеристики, є їхня здатність працювати з $\cos\varphi = 1$ і навіть з випереджальним струмом, тобто *генерувати реактивну потужність*. Для цього збільшують збудження двигунів.

Застосування синхронних двигунів дозволяє підвищити $\cos\varphi$ у системі і таким чином знизити втрати при передачі електроенергії.

Для підвищення $\cos\varphi$ у системі використовують також *синхронні компенсатори* – перезбуджені синхронні двигуни полегшеної конструкції, які працюють вхолосту.

Втрати і ККД синхронних машин. У синхронних машинах мають місце електричні втрати в роторі й статорі, магнітні втрати в осерді статора, механічні втрати на вентиляцію і тертя обертових частин. У двигунах великої потужності ККД досягає 0.95–0.98; ККД потужних генераторів дуже великий і дорівнює 0.99 при потужності ~ 1000 МВт.

Синхронні мікродвигуни. Жорсткість механічної характеристики є головною причиною великого поширення синхронних мікродвигунів в установках автоматики, телемеханіки, звукозапису, телебачення і т. д. Конструкції цих двигунів різноманітні.

За принципом дії синхронний двигун із постійними магнітами не відрізняється від синхронного двигуна зі збудженням постійним струмом.

Принципові відмінності має *синхронний реактивний двигун*. Його статор виконаний з трифазною обмоткою (або обмоткою конденсаторного двигуна). На явнopolюсному роторі немає обмотки збудження. При ввімкненні двигуна обертове поле захоплює ротор з короткозамкнутою пусковою обмоткою, і коли ротор досягне частоти обертання, близької до синхронної, виникає реактивний момент, що втягує ротор у *синхронізм*. Магнітні силові лінії прагнуть замкнути-

ся по шляхах із найменшим магнітним опором і на явнополюсний ротор діє *синхронізуючий момент*.

Ротор *реактивного двигуна* може бути і циліндричний: в алюмінієвий циліндр ротора закладають смуги м'якої сталі, що створюють необхідну різницю в магнітному опорі.

Обертаючий момент *гістерезисного двигуна* створюється за рахунок явища гістерезису при перемагнічуванні феромагнітного матеріалу ротора. У такому двигуні вісь намагнічування ротора відстає від осі обертового поля на кут θ , чим і створюються тангенціальні складові сили взаємодії ротора і поля. Ці двигуни мають порівняно великий пусковий момент, просту конструкцію, надійні й безшумні.

Редукторні двигуни застосовують у колах підвищеної частоти (до 30 кГц), що дає змогу одержувати частоти обертання від 60 до 5000 об/хв. Ротори таких двигунів виконані без обмотки: наявна велика кількість зубців z , що, у принципі, можна розглядати як полюси.

Синхронна частота обертання ротора $n_2 = 60f_1/z$, в той час як магнітне поле обертається з частотою $n_1 = 60f/z$. Відношення

$$n_1 / n_2 = z / p = k_{\text{ред}} \quad (7.6)$$

називається *коефіцієнтом редукції*.

Крокові двигуни – це синхронні мікродвигуни, обмотки статора яких живиться імпульсною напругою, що подається від якого-небудь (наприклад, електронного) комутатора.

Під дією кожного такого імпульсу ротор двигуна робить певне кутове переміщення – *крок*.

Крокові двигуни застосовують у стрічкопротяжних пристроях для введення і виведення інформації, лічильниках, приводах верстатів із програмним керуванням.

ЛЕКЦІЯ 8

8.1. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Машины постійного струму використовують як двигуни і генератори. Двигун і генератор постійного струму принципово влаштовані однаково.

Генератори застосовуються для живлення електродвигунів у спеціальних системах електроприводів, установок електролізу, для зарядки акумуляторів, для зварювальних робіт на постійному струмі, а *двигуни* – для приводу механізмів, що вимагають великих пускових моментів, широкого і плавного регулювання частоти обертання (транспорт, піднімальні пристрої, верстати). Використання їх у приводах дозволяє істотно спростити систему регулювання швидкості. Визначальною для використання двигуна є його *механічна характеристика*.

Промисловість випускає двигуни постійного струму звичайної конструкції в діапазоні потужностей 0.3–200кВт.

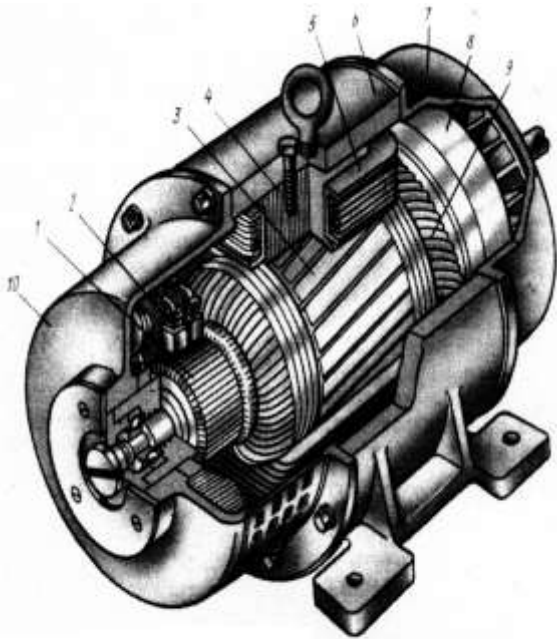


Рис. 8.1–Будова двигуна постійного струму

полюсів, повітряні зазори і сталь якоря 3. З торців корпус закритий підшипниковими щитами 7 і 10.

Будова. Розглянемо будову (рис. 8.1) машини постійного струму з однією парою полюсів ($p = 1$). Число полюсів може бути і ільшим, але це завжди парне число, тобто $2p$.

На внутрішній циліндричній поверхні сталевого корпусу – станини 6 статора укріплені полюси 4 з обмотками збудження 5.

Ці обмотки живляться постійним струмом і створюють магнітний потік, що замикається через станину, осердя

На роторі розташований якір 3 з колектором 1 і вентилятор 8 для охолодження машини. Якір являє собою циліндричне осердя, у пазах якого покладені й закріплені мідні провідники. Ці провідники, з'єднані у певному порядку, утворюють замкнуту обмотку 9 якоря.

Осердя якоря і полюсів набирають з листів електротехнічної сталі для зменшення втрат на вихрові струми і перемагнічування.

Колектор має форму циліндра і складається з мідних пластин, ізолюваних між собою і від вала. До кожної з пластин приєднані виводи провідників обмотки якоря. Обмотка якоря із зовнішнім колом зв'язана через щітки 2 (вугільні, графітні та ін.), що пружинами щільно притиснуті до колектора. Щіткотримачі кріпляться на підшипниковому щиті машини 10.

Принцип дії. У провідниках обмотки якоря при їхньому переміщенні в магнітному полі наводяться ЕРС, що складають сумарну ЕРС машини.

ЕРС, індуковані в окремих провідниках обмотки якоря, прямо пропорційні індукції магнітного поля і швидкості їхнього переміщення в цьому полі. Внаслідок цього і сумарна ЕРС E машини прямо пропорційна частоті обертання ротора n і магнітному потоку Φ :

$$E = C_E n \Phi, \quad (8.1)$$

де C_E – постійний коефіцієнт, що залежить від конструктивних даних машини.

У провідниках обмотки якоря протікають струми. При цьому щітково-колекторний вузол виконує роль механічного випрямляча, забезпечуючи необхідний напрямок струму в провідниках обмотки якоря. На кожен провідник зі струмом, що перетинає магнітне поле, діє сила тим більша, чим більший струм і чим сильніше магнітне поле. Сили, що діють на всі провідники обмотки якоря, створюють сумарний електромагнітний обертовий момент M , що прямо пропорційний струмові якоря I_a і магнітному потоку Φ :

$$M = C_M \Phi I_a, \quad (8.2)$$

де C_M – постійний коефіцієнт, що залежить від конструктивних даних машини.

Особливості роботи машин постійного струму. При проходженні струму в ковзному контакті щіток з колектором можливе іскріння. Воно небажане,

оскільки руйнує колектор і щітки. Іскріння може бути пов'язане з нерівностями поверхні колектора, поганим закріпленням щіток, неправильним вибором тиску на щітку і т. д. Тому потрібна періодична проточка, шліфування колектора й інші заходи для підтримки якості ковзного контакту.

Іскріння зростає (комутація погіршується) зі збільшенням струму якоря і частоти його обертання.

Струм якоря створює власний магнітний потік, що спотворює і навіть зменшує магнітний потік машини. Це явище називається реакцією якоря. Через реакцію якоря знижується ЕРС машини і погіршуються умови роботи колектора – посилюється іскріння під щітками.

Для поліпшення комутації між основними полюсами 1 установлюють додаткові полюси 2 (рис. 8.2), струми обмоток яких створюють у зоні комутації магнітний потік, протилежний магнітному потоку якоря.

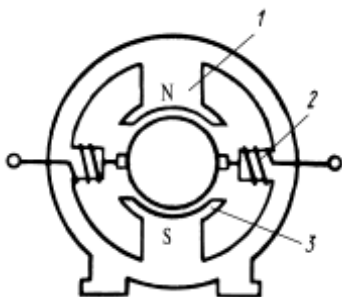


Рис. 8.2–Схема вмикання додаткових полюсів

Для повної компенсації реакції якоря в машинах може бути спеціальна *компенсаційна* обмотка, яка вкладається у пази основних полюсних наконечників 3. Потік, створений цією обмоткою, спрямований протилежно потоку обмотки якоря.

Обмотки додаткових полюсів і компенсаційні обмотки включають послідовно з обмоткою якоря, для того, щоб зі збільшенням струму якоря збільшувалася і їхня компенсуюча дія.

У машинах постійного струму для створення магнітного потоку використовують *електромагнітне збудження*. Збудження від постійних магнітів зустрічається тільки в мікромашинах. Залежно від способу включення обмоток збудження ОЗ (рис. 8.3) щодо обмоток якоря, машини постійного струму підрозділяють на машини *незалежного* (рис. 8.3, а), *паралельного* (рис. 8.3, б), *послідовного* (рис. 8.3, в), *змішаного* (рис. 8.3, г) збудження.

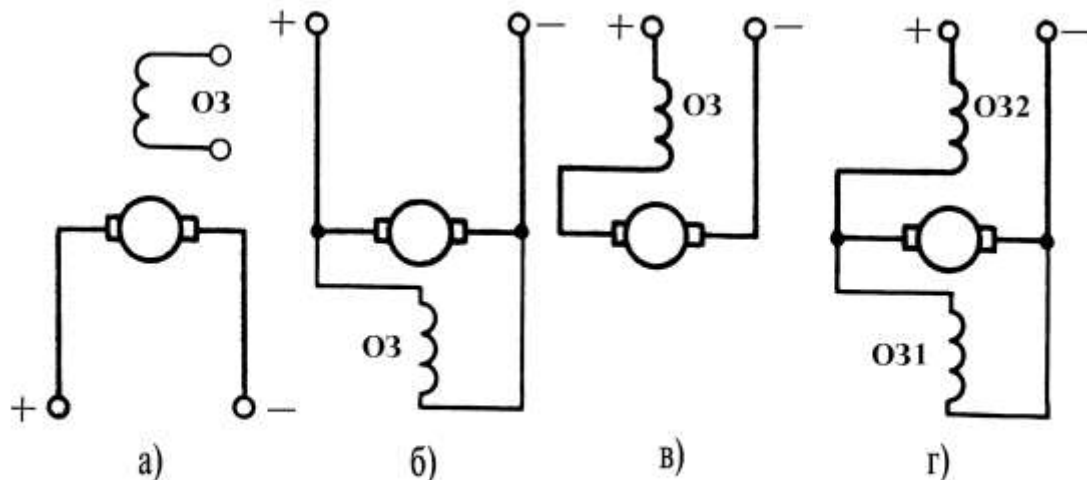


Рис. 8.3– Схеми збудження машин постійного струму.
 а) незалежного, б) паралельного, в) послідовного, г) змішаного

Генератори. У генераторному режимі роботи ротор машини приводиться в обертання первинним двигуном (звичайно асинхронним, або двигуном внутрішнього згорання), а коло обмотки якоря замкнуте на навантаження. ЕРС машини E викликає струм у навантаженні. Напряга на затискачах генератора менша цієї ЕРС через спадання напруги в колі обмотки якоря і в обмотках, включених послідовно з нею, а також через реакцію якоря.

Електромагнітний момент у генераторному режимі спрямований у бік, протилежний обертанню ротора, тобто є гальмовим.

Чим більше навантаження генератора (чим більший струм $I_{я}$), тим більший гальмовий момент M доводиться переборювати первинному двигуноу генератора. Повна перетворена генератором електромагнітна потужність

$$P_{ем} = EI_{я} = M\omega \approx Mn/9.55,$$

де $\omega = \pi n/360$ – кутова швидкість обертання ротора.

Великий практичний інтерес викликає зовнішня характеристика генератора, що показує, як змінюється вихідна напруга генератора U при збільшенні струму I через навантаження.

Причин для зміни напруги дві: спадання напруги всередині генератора і зміна ЕРС за рахунок реакції якоря і зміни струму збудження. На рис. 8.4 представлені зовнішні характеристики генераторів різного збудження.

Для генераторів незалежного і паралельного збудження (криві 1 і 2) напруга знижується при збільшенні навантаження, причому для генератора паралельного збудження в більшій мірі, тому що при його навантаженні зменшується і струм збудження.

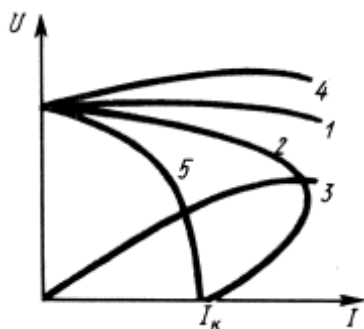


Рис. 8.4— Зовнішні характеристики генераторів різних типів збудження

При поступовому зменшенні опору навантаження до нуля струм I_k короткого замикання генератора паралельного збудження невеликий, тому що напруга на обмотці збудження стає рівною нулю і ЕРС визначається тільки потоком залишкового намагнічування. При миттєвому короткому замиканні струм великий, тому що ЕРС машини в перший момент не встигає змінитися.

Генератори послідовного збудження застосовують мало. Для них характерне збільшення напруги при збільшенні навантаження, оскільки при цьому зростає струм збудження (крива 3).

Вид зовнішньої характеристики генератора змішаного збудження залежить від способу з'єднання обмоток.

При їхньому погодженому з'єднанні магнітні потоки, створювані обмотками, складаються, тому при збільшенні навантаження магнітний потік машини зростає і збільшується ЕРС (крива 4). Напруга з ростом навантаження може навіть трохи збільшитися.

При зустрічному з'єднанні обмоток зовнішня характеристика має різко падаючий характер (крива 5), тому що при збільшенні навантаження струм послідовної обмотки створює магнітний потік, протилежний потоку паралельної обмотки. Таку зовнішню характеристику має зварювальний генератор, для якого режим короткого замикання є експлуатаційним.

Напругу генераторів регулюють зміною струму в обмотці збудження.

Потужність, яка витрачається на збудження, відносно невелика (1–5% від номінальної потужності машини), що дозволяє економічно регулювати напру-

гу. Рівень напруги генераторів звичайно підтримується за допомогою автоматичних регуляторів.

Двигуни. У режимі двигуна коло якоря машини підключене до мережі постійного струму з напругою U . У ньому протікає струм $I_{\text{я}}$. При взаємодії його з потоком обмотки збудження виникає електромагнітний обертаючий момент M , що переборює момент опору з боку механізму, який приводиться в рух. ЕРС E двигуна спрямована протилежно прикладеній напрузі U :

$$E = U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}; E < U. \quad (8.3)$$

Машина споживає енергію з мережі. Чим більший момент двигуна, тим більший струм він споживає.

Повна перетворена в двигуні електромагнітна потужність

$$P_{\text{ем}} = EI_{\text{я}} = M\omega, \quad (8.4)$$

де ω – кутова швидкість обертання якоря.

Пуск двигунів супроводжується великим струмом, що протікає через обмотку якоря. Тому без пускових реостатів (додаткових опорів $R_{\text{дод}}$ у колі якоря), щоб уникнути аварії, пускають тільки двигуни потужністю до 1 кВт. Великий пусковий струм виникає тому, що опір в колі якоря $R_{\text{я}}$ невеликий, подавана напруга U номінальна, а ЕРС E , яка в робочому режимі врівноважує значну частину прикладеної напруги, у момент пуску дорівнює нулю. Струм у колі якоря

$$I_{\text{я}} = (U - E) / (R_{\text{я}} + R_{\text{дод}}). \quad (8.5)$$

Із збільшенням частоти обертання якоря зростає ЕРС E , а струм $I_{\text{я}}$ знижується.

Опір $R_{\text{дод}}$ звичайно відповідає кільком ступеням пускового реостата, що у перший момент вводять повністю і в міру запуску послідовно одну за одною відключають з таким розрахунком, щоб струм двигуна при пуску не перевищував припустимого значення.

Серед усіх електродвигунів двигуни постійного струму мають найкращі пускові властивості. При відносно невеликому пусковому струмі $(2 \div 2.5) I_{\text{н}}$ вони можуть створювати досить великий пусковий момент $(2.5 \div 4) M_{\text{н}}$.

Реверс (зміна напрямку обертання) двигуна можна здійснити, змінивши напрямок обертового моменту M . Оскільки $M = C_M \Phi I_{я}$, – знак моменту зміниться, якщо змінити або напрямок струму в обмотці якоря, або напрямок магнітного потоку. Зазвичай для реверса змінюють полярність напруги на обмотці якоря, тобто напрямок струму в обмотці якоря.

З характеристик двигуна найбільше практичне значення має *механічна характеристика*, що показує, як змінюється частота обертання ротора при зміні моменту M на валу.

Механічна характеристика, отримана при номінальних значеннях напруги живлення і відсутності додаткового опору в колі якоря, називається природною.

На рис. 8.5 представлені механічні характеристики двигунів із різним збудженням, причому крива 1 на всіх рисунках – *природна характеристика*, а крива 2 – *штучна*, отримана при включенні додаткового опору в коло якоря двигуна.

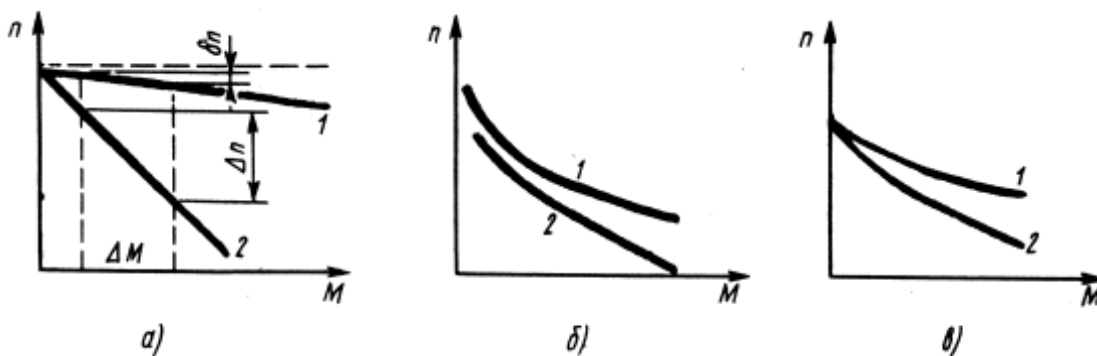


Рис. 8.5–Механічні характеристики двигунів постійного струму з різним збудженням:
1 – природна, 2 – штучна

Для двигунів незалежного і паралельного збудження механічна характеристика лінійна (рис. 8.5, а). Ідеальному холостому ходу ($M = 0$) відповідає частота обертання n_0 . При збільшенні моменту частота обертання зменшується. Якщо це зниження швидкості незначне (δn), то характеристика називається *жорсткою* (крива 1). Чим більший опір у колі якоря, тим «м'якша» характеристика (крива 2), тим більша зміна частоти обертання (Δn).

Двигун послідовного збудження має м'яку механічну характеристику (рис. 4.26, б), тому що при збільшенні моменту M і зростанні струму якоря зростає магнітний потік Φ , і частота обертання двигуна знижується.

Характерною рисою двигуна послідовного збудження є різке збільшення частоти обертання при зниженні навантаження.

При малих навантаженнях частота може досягти неприпустимо великих значень. Щоб цього не трапилося, на валу двигуна повинне бути навантаження не менше 25 % від номінального.

Механічна характеристика двигуна змішаного збудження (рис. 8.5, в) займає середнє положення між характеристиками двигунів паралельного і послідовного збудження. Характеристика м'яка, але через наявність паралельної обмотки частота обертання на холостому ході обмежена.

Частоту обертання двигуна n можна регулювати трьома способами: зміною напруги, яку подають на обмотку якоря, зміною магнітного потоку і включенням додаткового опору в коло якоря.

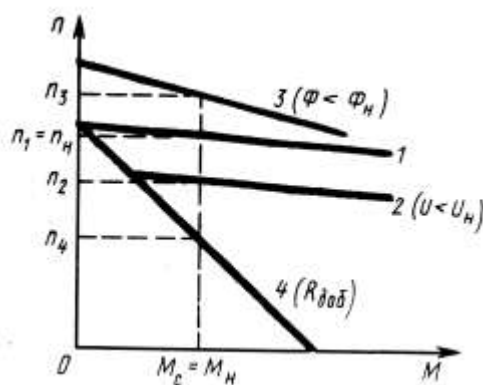


Рис. 8.6—Регулювання частоти обертів двигуна незалежного збудження

На рис. 8.6 для двигуна незалежного збудження дані природна механічна характеристика (1) і штучні (2, 3, 4), що відповідають вказаним трьом способам регулювання частоти обертання n . Положення робочої точки на всіх характеристиках взяте при моменті опору $M_c = M_H$.

При зниженні напруги U на якорі (крива 2) n зменшується, а жорсткість характеристики зберігається. При зменшенні магнітного потоку Φ зростає n , при введенні в коло якоря додаткового опору $R_{\text{доп}}$ знижується n , і в обох випадках характеристика буде «м'якшою». Метод регулювання n введенням $R_{\text{доп}}$ неекономічний, що обмежує його застосування. Два інших способи застосовують частіше.

Регулювання частоти обертів двигунів послідовного збудження можна робити: включенням $R_{\text{доп}}$ (рис. 8.7, а), переключенням одноступінних двигунів з паралел-

льного з'єднання на послідовне (рис. 8.7, б), шунтуванням обмотки якоря й обмотки збудження (рис. 8.7, в), секціонуванням обмотки збудження (рис. 8.7, г).

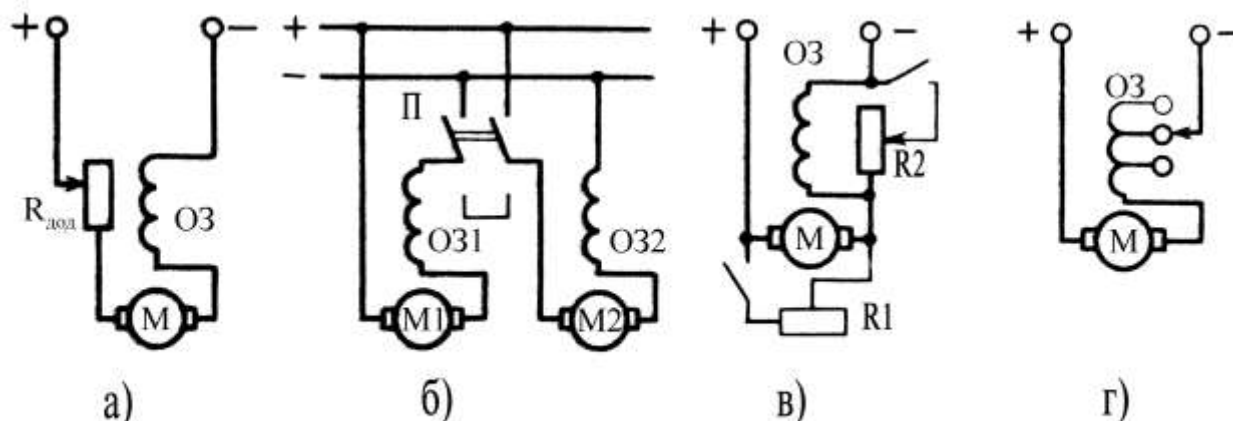


Рис. 8.7—Схеми регулювання частоти обертів двигунів послідовного збудження

Втрати потужності в машинах постійного струму складаються із: втрат у сталі (на гістерезис і вихрові струми в магнітному колі машини), електричних втрат (в обмотках якоря і збудження, щітковому контакті) і механічних втрат (тертя щіток об колектор, у підшипниках, обертових частин об повітря). Приблизно 50 % усіх втрат у номінальному режимі складають *електричні втрати в якорі*. ККД двигунів звичайно дорівнює 75–97 %. Більші значення ККД мають потужні електричні машини.

Мікродвигуни постійного струму застосовують як виконавчі для обертання механізмів.

Мікродвигуни з якорем звичайного типу можуть мати електромагнітне збудження і збудження від постійного магніту.

Мікродвигуни з пустотілим якорем виконують з якорем у вигляді порожнього циліндра, розташованого між полюсами і нерухомим феромагнітним сердечником. Такі двигуни малоінерційні.

У мікродвигунах з друкованою обмоткою якоря обмотка нанесена електрхімічним способом на тонкий диск (або поверхню порожнього циліндричного якоря) з немагнітного матеріалу. Вони малоінерційні, безшумні в роботі, технологічні за конструкцією. Потужності мікродвигунів складають від часток вата до декількох кіловатів.

Тахогенератори постійного струму виконують з постійними магнітами на статорі або з електромагнітним збудженням від незалежного джерела постійного струму.

Електромашинні підсилювачі являють собою спеціальні електричні генератори, вихідна потужність яких може змінюватися в широких межах шляхом зміни потужності керування. Відношення вихідної потужності до потужності керування, тобто *коефіцієнт підсилення за потужністю*, може досягати декількох тисяч або навіть десятків тисяч. Промисловістю випускаються такі підсилювачі на потужності від декількох сотень ват до десятків кіловат.

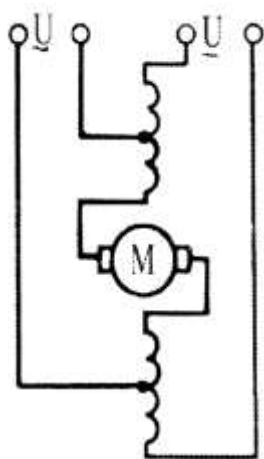


Рис. 8.8—Схема універсального колекторного двигуна

Універсальні колекторні машини. *Принципово будь-який двигун постійного струму може працювати від мережі змінного струму, тому що обертовий момент не змінює напрямку при одночасній зміні напрямку струму в якорі і в полюсах. Однак у двигуні паралельного збудження струм у якорі і магнітний потік зміщуються за фазою майже на чверть періоду через велику індуктивність обмотки збудження. Обертовий момент виявляється занадто малим.*

У двигуні ж послідовного збудження струм у якорі є одночасно і струмом збудження, тому універсальний колекторний двигун принципово побудований так само, як двигун послідовного збудження (рис. 8.8).

Універсальні колекторні двигуни малої потужності широко застосовують для приводу побутових приладів і автоматичних пристроїв у тих випадках, коли потрібна частота обертання більша 3000 об/хв при живленні від мережі 50 Гц, плавне регулювання частоти обертання в широких межах або великий пусковий момент. Так, для пирососів потрібні швидкості обертання 12 000–16 000 об/хв, для швейних машин – плавне регулювання швидкості.

ЛЕКЦІЯ 9

9. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Електричні апарати – це електротехнічні пристрої, призначені для керування електричними і неелектричними об'єктами, а також для захисту цих об'єктів при ненормальних режимах роботи. Електричні апарати відіграють важливу роль на всіх етапах виробництва, передачі, розподілу і споживання електроенергії.

9.1. ВИСОКОВОЛЬТНІ АПАРАТИ

Високовольтні апарати призначені для роботи в мережах напругою $U \geq 1000$ В. *Високовольтні вимикачі* – це пристрої, призначені для вмикання і вимикання електричних кіл напругою вище 1000 В під навантаженням і для автоматичного вимикання при небезпечних перевантаженнях і коротких замиканнях.

Швидке вимикання кіл при короткому замиканні є найбільш відповідальною операцією, яку виконують за допомогою вимикачів, тому що це запобігає пошкодженню устаткування і порушенню нормальної роботи енергосистеми.

Струми короткого замикання в колах високої напруги звичайно досягають десятків і сотень кілоампер.

При розмиканні контактів вимикачів виникає електрична дуга, що збільшує час відключення струму і руйнує контакти. Тому у високовольтних вимикачах необхідне *швидке гасіння дуги*. Існують різні способи гасіння дуги, засновані на її інтенсивній деіонізації та охолодженні, підвищенні електричної міцності середовища, в якому дуга може виникнути.

Спосіб гасіння дуги є основним чинником, що визначає конструкцію вимикачів.

Розрізняють *масляні, повітряні, елегазові, автогазові, електромагнітні, вакуумні* та інші вимикачі. Керують вимикачами спеціальним приводом і, як

правило, дистанційно. В установках невеликої потужності застосування високовольтних потужних вимикачів недоцільне через їхню велику вартість і розміри. Тому в цехових, сільськогосподарських і підсобних підстанціях використовують так звані *вимикачі навантаження*. Це – автогазові вимикачі, не розраховані на переривання струмів короткого замикання. Як правило, їх встановлюють разом з високовольтними плавкими запобіжниками.

Роз'єднувачі – це апарати, призначені для комутації ділянок електричних кіл під напругою при відсутності струму навантаження. Їх застосовують для забезпечення видимого розриву кола, а також для переключень при складанні необхідної схеми електричних з'єднань. Роз'єднувачі можуть бути *однополюсними* і *триполюсними*. Поліус роз'єднувачів незалежно від різноманітності їхніх конструкцій складається з *нерухомого* і *рухомого* (ножа) *контактів*, укріплених на ізоляторах, *опорної плити* і *рами*. Роз'єднувачі можуть мати *ручний*, *електродвигуновий* або *пневматичний* привод.

У сучасних потужних електричних мережах для зниження струмів короткого замикання і створюваних ними електродинамічних сил застосовують *струмообмежуючі реактори*.

Реактор – це котушка індуктивності, розрахована на протікання великих струмів. Для підтримки постійним індуктивного опору реактори виконують без сталевих осердь, внаслідок чого вони мають великі розміри і масу.

Розрядники – апарати для захисту електроустановок від перенапруг (наприклад, при грозі). У розряднику перенапруги знижуються до значень, безпечних для ізоляції мережі, яку захищають, а енергія перенапруги відводиться в землю через заземлюючий провідник.

Принцип дії різних конструкцій розрядників заснований на електричному пробі ізоляційного проміжку з наступним відновленням його електричної міцності (після зняття перенапруги).

Останнім часом замість розрядників застосовують нелінійні обмежувачі перенапруги (ОПН), які мають значно кращі захисні характеристики. В ОПН ізоляційний проміжок відсутній.

9.2. АПАРАТИ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ

До апаратів низької напруги відносять пристрої, що працюють в електричних мережах до 600 В. Серед них розрізняють комутаційні апарати, апарати захисту, пускові й регулювальні резистори, реле різного призначення.

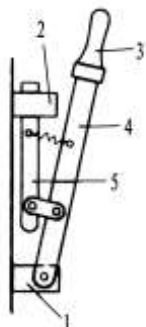


Рис. 9.1– Будова рубильника

Рубильники – це найпростіші ручні комутаційні апарати.

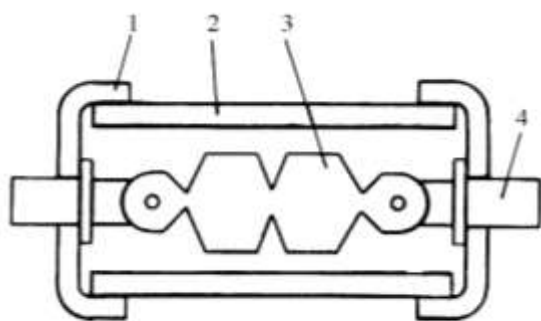
Рубильники можуть бути *одно-, дво- і триполюсними*. Їхні основні елементи (рис. 9.1): *контакти, дугогасильний пристрій, привод*.

Контактні ножі 4 рубильника можуть шарнірно повертатися в нижньому контакті 1 і при включенні затискаються в пружних губках 2 верхніх контактів. Рубильники можуть мати центральну або бічну рукоятку 3 або важільний привод. Для гасіння дуги використовують дугогасильні контакти 5 і спеціальні дугогасильні камери.

Пакетні вимикачі – це пристрої, які використовують в мережах із напругою до 380 В і струмами до 100 А, призначені для переключень, що виконують одночасно в декількох електричних колах.

Вони складаються з декількох малогабаритних однополюсних вимикачів, розташованих на загальній осі один над одним і керованих за допомогою загальної рукоятки. В одній площині з рухомими контактами розміщують фіброві дугогасильні шайби, що обертаються разом із контактами. Приводний механізм при повороті рукоятки переводить рухомі контакти з одного фіксованого положення в інше, замикаючи їх із нерухомими контактами (або розмикаючи їх).

Запобіжники – це пристрої для захисту електричних мереж від перевантажень і коротких замикань.



Елементом запобіжників, який розриває коло, є *плавка вставка* – дрід або металева пластинка, що розплавляється при протіканні по ній струму, небезпечного для мережі, яку захищають.

На рис. 9.2 показано, як влаштований *розбірний трубчастий запобіжник*. Він складається з трубки 2 з фібри, ковпаків, що нагвинчуються 1, контактних ножів 4. Усередині трубки до ножів приєд-

нана плавка вставка 3. При перегорянні вставки під впливом високої температури невелика частина фібри розкладається, й у закритому корпусі розвивається тиск газів до 100 атмосфер. Дуга, яка виникла, швидко гасне.

У запобіжниках іншого типу плавка вставка вміщена в корпус, заповнений кварцовим піском, що також сприяє швидкому гасінню дуги.

Один і той самий запобіжник можна використовувати з плавкими вставками на різні номінальні струми.

Номінальний струм запобіжника – це найбільший із номінальних струмів плавких уставок, призначених для даної конструкції запобіжника.

Після відключення кола заміняють перегорілу вставку або весь запобіжник.

Простота влаштування і обслуговування, малі розміри, висока вимикаюча здатність, невелика вартість забезпечили запобіжникам широке застосування. Запобіжники низької напруги виготовляють на струми від міліамперів до тисяч амперів і на напруги до 660 В. Недоліком запобіжників є те, що вони в основному одноразової дії.

Автоматичні повітряні вимикачі (автомати) – це апарати, що служать для автоматичного розмикання електричних кіл при порушенні нормального режиму їхньої роботи, а також для нечастих замикань і розмикань кіл у нормальних умовах.

В автоматах є ефективна система гасіння дуги (дугогасильні котушки і решітки) і механізм вільного розчіплювання (система шарнірно-пов'язаних важелів). Цей механізм приводиться в дію біметалічним тепловим (реагуючим на

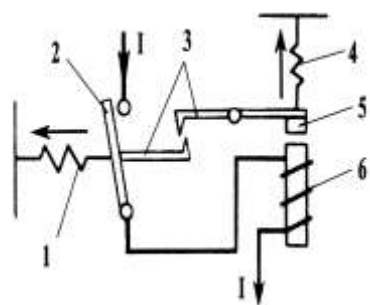


Рис. 9.3–Влаштування автомата максимального струму

перевантаження) або електромагнітним (реагуючим на струм короткого замикання або зниження напруги) елементом і виконує швидке відключення кола.

Включати і відключати автомати можна як вручну, так і дистанційно. На рис. 9.3 показана схема влаштування автомата максимального струму. Коли струм I стає більше заданого значення, електромагніт 6, притягаючи якорь 5, переборює зусилля протидіючої

пружини 4 і звільняє фіксатор 3. Під дією поворотної пружини 1 відбувається швидке розмикання контактів 2.

Резистори – це пристрої, призначені для обмеження або регулювання струму і напруги.

Їх використовують як пускові, гальмові, регулюючі, розрядні опори в електричних колах низької напруги, електроприводів та інших електроприймачів. Резистори виготовляють з матеріалів з високим опором у широкому діапазоні їхніх номінальних значень (від одиниць ом до десятків кілоом) і припустимих струмів (від одиниць до сотень амперів).

Конструкції резисторів різноманітні. Найбільш розповсюдженими з них є: *трубчасті резистори*, виконані з ніхромового або константанового дроту на теплоємному керамічному або порцеляновому каркасі і покриті емаллю для поліпшення тепловіддачі; резистори *рамкової конструкції*, в яких дріт або стрічка з константану або фехрально намотані на порцелянові ізолятори, закріплені на ребрах сталевих пластин тримача (з таких резисторів можна комплектувати «шафи опорів», які звичайно використовують в силових колах електроприводів); *чавунні литі і сталеві, штамповані* з електротехнічної сталі, резистори. Чавунні литі й сталеві штамповані резистори збирають у шафи у вигляді пакетів на ізольованих стержнях.

Реостати – це апарати, що складаються з резисторів і пристроїв для регулювання опору і призначені для безрозривної зміни опору.

У *металевих реостатах* безрозривна зміна опору здійснюється за рахунок ковзання пружного контакту по резистору, намотаному на направляючий ізолюючий стержень (або на кільце в реостаті з круговим рухом рукоятки).

У реостатах *зі ступінчастою зміною опору* щітка плоского перемикача ступенів ковзає по нерухомих контактах, зв'язаних із набором резисторів.

У *рідинних реостатах* опір плавно регулюється зміною глибини занурення електродів у електроліт.

Контролери – це комутаційні апарати ручного керування з великим числом контактних елементів.

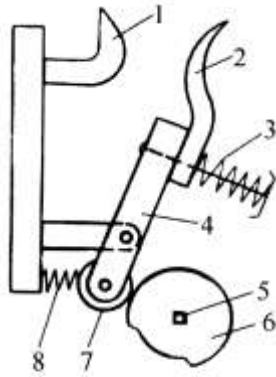


Рис. 9.4—Схема контактної частини кулачкового контролера

Контролери служать для пуску, реверсу і регулювання частоти обертання двигунів. Різні схеми з'єднання одержують поворотом рукоятки контролера на певний кут.

На рис. 9.4 наведена схема контактної частини найбільш розповсюдженої конструкції *силового кулачкового контролера*. Дія на контактний важіль 4 передається від приводного вала 5 через фігурний кулачок 6 і ролик 7. Пружина 3 забезпечує необхідне стискання контактів 1 і 2 при включенні, пружина 8 — поворотна.

Командоконтролери — апарати для дистанційного керування потужними електродвигунами.

Їх використовують для включення і відключення котушок контакторів та інших апаратів. Влаштування командоконтролерів аналогічне влаштуванню силових контролерів. У них може бути привод від двигуна, тоді їх називають *програмними реле*.

Універсальні перемикачі — це пристрої для переключення великого числа кіл керування. Вони бувають різних типів і серій — відрізняються один від одного числом секцій, діаграмою замикання контактів, числом фіксованих положень і кутом повороту рукоятки.

Кнопки керування часто поєднуються в *кнопкові пости*, а також у *шляхові і кінцеві вимикачі*, — це командоапарати, що використовуються для переключень у колах керування.

Шляхові й кінцеві вимикачі широко застосовують у металорізальних верстатах і підйомно-транспортних пристроях. Усі подібні елементи повинні мати

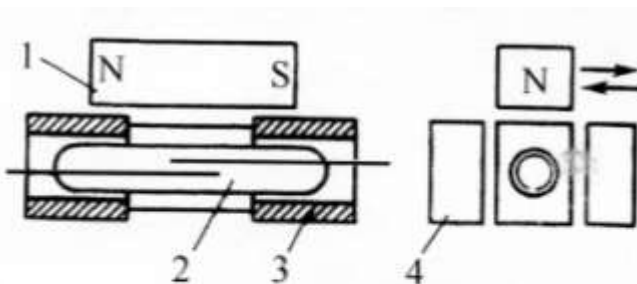


Рис. 9.5—Схема шляхового вимикача з застосуванням магнітокерованого контакту

високу зносостійкість, оцінювану звичайно сотнями тисяч циклів.

Широкі можливості для підвищення зносостійкості й точності роботи командоапаратів дає застосування магнітокерованих контактів (рис. 9.5). Принцип дії такого контакту заснований на тому, що

постійний магніт 1, пов'язаний з механізмом, приводить до спрацьовування магнітокерovanого контакту 2 залежно від положення механізму. Полюсні башмаки 3 і 4 служать для підвищення точності спрацьовування апарата.

Електромагнітні контактори – це електричні апарати, призначені для включення і відключення силових кіл за допомогою електромагнітів.

Електромагнітний контактор складається з втягуючої котушки, рухомого якоря, системи головних контактів, пристрою для дугогасіння і часто забезпечується комплектом допоміжних блок-контактів. Головні контакти розраховані на включення і відключення великих струмів (до 1000 А). Втягуючі котушки, робочий струм яких невеликий, включаються і відключаються дистанційно.

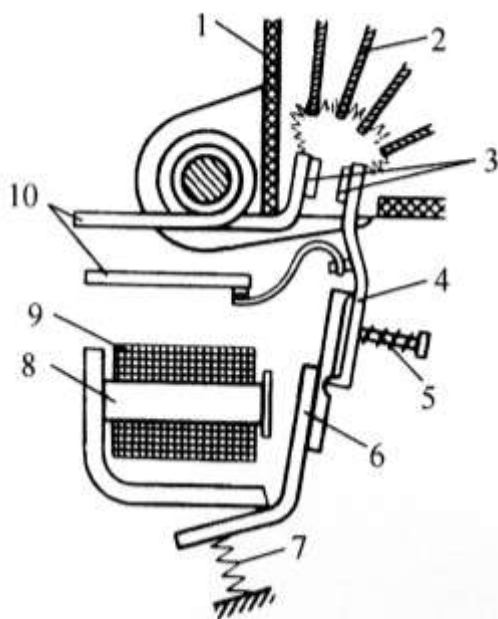


Рис. 9.6– Будова контактора постійного струму

Будова контактора постійного струму показана на рис. 9.6. З появою струму збудження в обмотці 9 головні контакти 3 замикаються під дією пружини 5 за рахунок притягання якоря 6 з важелем 4 до ярма 8. Розмикання контактів відбувається, під впливом пружини 7. У конструкції використовується дугогасильна камера 1 з решіткою з мідних пластин 2, що поліпшують відвід тепла від дуги. Позиція 10 відповідає вводам струму.

Електромагнітні контактори змінного струму використовують у магнітних пусках – комплектних пристроях, що складаються з трьохполюсного контактора, двох теплових реле, кнопок керування і призначені для дистанційного керування і захисту від перевантажень асинхронних двигунів. Основними величинами, що характеризують контактор, крім номінального струму і напруги є час спрацьовування і відпускання, а також напруга втягуючої котушки.

Реле – це пристрої, в яких при досягненні певного значення вхідної величини вихідна величина змінюється стрибком.

Вхідною величиною для реле можуть бути механічні, теплові, електричні та інші зовнішні впливи. Реле використовуються для захисту електричних кіл, а також для виконання логічних і вимірювальних функцій у системах керування. Реле захисту електричних кіл спрацьовують при порушенні нормального режиму роботи або відключають ушкоджену ділянку, відновлюючи нормальний режим роботи. Велике поширення одержали електричні реле захисту (електромагнітні, магнітоелектричні, електродинамічні, індукційні), що реагують на зміну струму в обмотці керування. У первинних реле обмотка включається безпосередньо в основне коло об'єкта, що захищається, у вторинних – у вторинні кола вимірювальних трансформаторів струму і напруги.

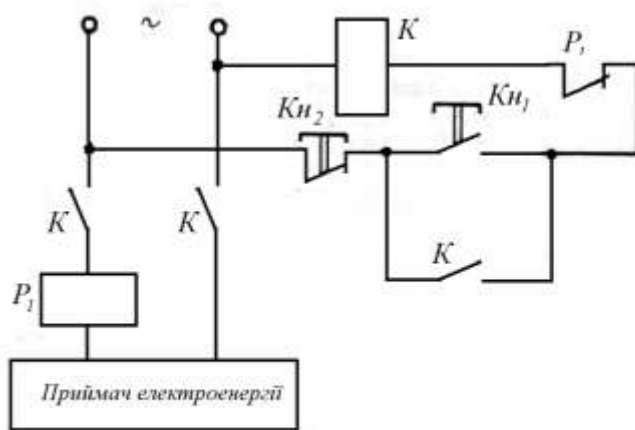


Рис. 9.7– Схема вмикання реле максимального струму для захисту приймача електроенергії

Розглянемо принципову схему захисту приймача електроенергії за допомогою реле максимального струму, подану на рис. 9.7.

Вмикання живлення приймача виконується силовими контактами контактора K , котушка якого підключається до джерела

при замиканні кнопки Kn_1 . Блокувальний контакт K шунтує кнопку Kn_1 , що дозволяє відпустити її після короткочасного натискання. Відключається приймач при натисканні на кнопку Kn_1 , яка розриває коло живлення котушки K . Реле максимального струму P_1 , котушка якого включена послідовно в контрольоване коло, спрацьовує, якщо струм у цьому колі перевищує припустимі значення. При цьому розмикається контакт P_1 у колі котушки контактора K . Вона знеструмується, контакти контактора в силовому колі і колі керування розмикаються. Припиняється подача струму до приймача, для його вмикання треба знову натиснути кнопку Kn_2 .

У найбільш розповсюдженій конструкції реле максимального струму між полюсами електромагніта розміщений якір із магнітом'якого матеріалу. При відсут-

ності струму в обмотці реле пружина утримує якір у такому положенні, що керуючі контакти реле розімкнуті. Коли струм в обмотці перевищить припустимі значення, електромагнітна сила стане більшою від сили протидії пружини, якір повернеться, контакти замкнуться, видаючи сигнал у коло керування. Змінюючи повідцем, зв'язаним з пружиною, силу її протидії, можна змінювати настроювання реле на необхідний струм спрацьовування (*установку реле*) відповідно до шкали показчика.

Для захисту електроприймачів від перевантаження часто застосовують *теплове реле* (рис. 9.8). Воно складається з біметалічної (з двох різнорідних металів) пластини 2, що знаходиться в тепловому полі нагрівача 1, включеного

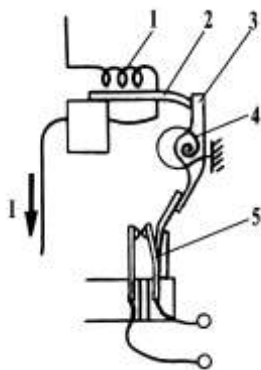


Рис. 9.8—Будова теплового реле

послідовно з приймачем, і з контактів 4. Якщо контрольований струм I більший припустимого, то через якийсь час, нагрівшись, біметалічна пластина зігнеться (у бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення). Пластина 2 звільнить фіксатор 3, який під дією пружини 4 повернеться і розімкне контакти 5 у колі керування електроприймача.

Для розмноження електричних сигналів, а також виконання логічних операцій у схемах релейно-контакторного керування використовують *електромагнітні проміжні реле*.

Конструкції їх різноманітні. Найчастіше застосовують *реле клапанного типу*. Контактна система такого реле містить декілька пар контактів, які комутують різні кола. У магнітному колі реле є центральне осердя (ярмо), обмотка збудження, включена в коло сигналу керування I_y , і якір, що при русі до осердя за допомогою траверси замикає контактні групи.

У схемах керування і захисту часто потрібно, щоб спрацьовування апаратів відбувалося через певний проміжок часу після подачі керуючого впливу. Для цього використовують *реле часу*, в яких витримка часу створюється за допомогою годинникового механізму або електромагнітним шляхом. В електромагнітних реле часу внаслідок струмів, що наводяться в спеціальній короткозамкнутій обмотці, магнітний потік зростає і спадає повільніше, чим і створюється необхідна витримка часу на спрацьовування або відпускання.

ЛЕКЦІЯ 10

10.1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ. ВИБІР АПАРАТІВ І СТРУМОПРОВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Електричним навантаженням називають потужність, яку електричний пристрій або окремий споживач одержує від мережі, для електростанцій – генеровану ними потужність.

Знати електричне навантаження необхідно, щоб розраховувати й вибрати апарати і струмопровідні елементи для використання їх в електричних пристроях (апаратах для керування і захисту, трансформаторах, провідниках, кабелях і т.п.).

Як правило, електричне навантаження не є постійним.

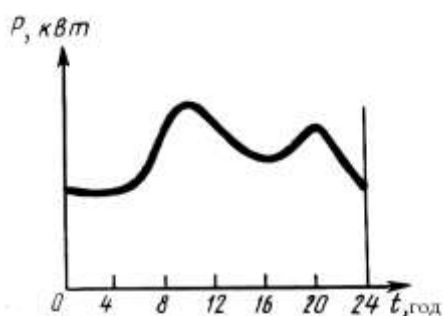


Рис. 10.1– Добовий графік навантаження промислового підприємства

Щоб представити його зміну в часі, будують *графіки навантаження* (рис. 10.1). Для визначення навантажень, у діючих установках використовують вимірювальні пристрої. При проектуванні нових підприємств навантаження визначають *обчислювальними методами*, а апарати і струмопровідні елементи вибирають на підставі *розрахункового навантаження*.

Для окремого споживача розрахунковим навантаженням є його номінальна потужність.

Для групи споживачів сума їхніх номінальних потужностей називається встановленою потужністю і не може дорівнювати розрахунковій, тому що не всі вони працюють одночасно і з номінальним навантаженням. У цьому випадку розрахункове навантаження визначається на базі реального електричного навантаження з використанням розрахункових методів.

В одному з таких методів використовують *коефіцієнт попиту* k_p , в якому враховані всі особливості режиму роботи групи споживачів. З його допомогою розрахункове навантаження визначають за формулою

$$P_{\text{роз}} = k_{\text{п}} P_{\text{вст}}. \quad (10.1)$$

Значення $k_{\text{п}}$ наводяться в довідковій літературі.

Умови вибору апаратів і струмопровідних елементів бувають загальними й специфічними.

Загальні умови справедливі для всіх пристроїв, *специфічні* – тільки для певних апаратів і струмопровідних елементів.

Більшість умов вибору апаратів і струмопровідних елементів записують у вигляді *нерівності*. Коли технічна характеристика апарата не збігається з розрахунковим значенням, *вибирають апарат із наступним більшим номінальним значенням*.

Найбільш важливі загальні умови, яких слід дотримуватись при виборі апаратів і струмопровідних елементів:

1. Номінальна напруга апарата повинна відповідати номінальній напрузі мережі:

$$U_{\text{ном.а}} \geq U_{\text{ном.мер}}. \quad (10.2)$$

2. Номінальний струм апарата повинен дорівнювати або бути більшим розрахункового:

$$I_{\text{ном.а}} \geq I_{\text{розр}}. \quad (10.3)$$

Цю умову називають *вибором за припустимим нагріванням*, тому що від нього залежить, наскільки будуть нагріватися апарати і струмопровідні елементи.

У загальні умови входить і *вид монтажу* (на відкритому повітрі, в закритому приміщенні), *стан навколишнього середовища* (нормальне, вологе, пожежонебезпечне, вибухонебезпечне) та ін.

Специфічні умови більш численні, тому що вони можуть бути різні для різних видів електричних пристроїв. Так, при виборі апаратів для високої напруги враховують *тепловий і динамічний вплив струмів короткого замикання* та інші додаткові умови. При виборі апаратів для низької напруги перевірка на динамічну стійкість не потрібна.

Вибір запобіжників. Найпоширенішими апаратами захисту від перевантажень і короткого замикання в електричних пристроях низької напруги є *плавкі запобіжники*. Їхнє влаштування досить просте, вони надійні й недорогі.

Їх вибирають, дотримуючись наступних умов:

1. Коло, що захищається, не повинне перериватися при нормальному режимі роботи, тобто повинна дотримуватися умова

$$I_{\text{пл.зп}} \geq I_{\text{розр}}, \quad (10.4)$$

де $I_{\text{пл.зп}}$ – номінальний струм плавкої вставки запобіжника, А; $I_{\text{розр}}$ – розрахунковий струм.

2. Коло, що захищається, не повинне перериватися в пусковому режимі. Оскільки для електродвигунів та ряду інших споживачів пусковий струм у декілька разів більший номінального, тобто для того, щоб плавкі вставки не розплавлялися під час пуску, повинна дотримуватися умова

$$I_{\text{пл.зп}} \geq I_{\text{п}}/2.5, \quad (10.5)$$

де $I_{\text{п}} = k_{\text{п}} I_{\text{ном}}$ – пусковий струм електродвигуна, А; $k_{\text{п}}$ – коефіцієнт кратності пускового струму.

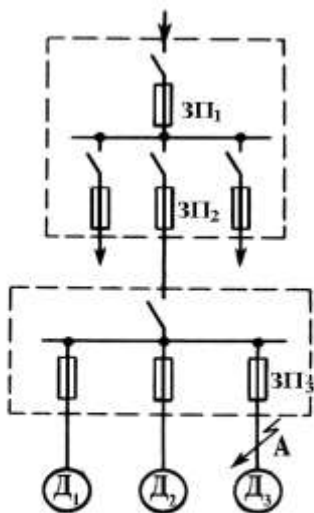


Рис. 10.2 -Схема селективного захисту

При виборі запобіжників, які встановлюють послідовно в колі, необхідно дотримувати умову селективності. Відповідно до неї номінальний струм плавкого запобіжника, найближчого до споживача (найбільш віддаленого від джерела живлення), повинен бути меншим хоча б на ступінь. Так, у схемі на рис. 10.2 номінальний струм плавкої вставки запобіжника $ЗП_2$ повинен бути більшим струму плавкої вставки запобіжника $ЗП_3$, а запобіжника $ЗП_1$ – більшим, ніж запобіжника $ЗП_2$. При короткому замиканні в точці А розплавиться вставка запобіжника $ЗП_3$ і відключиться живлення тільки електродвигуна $Д_3$.

Вибір проводів і кабелів. Переріз проводів і кабелів вибирають за значенням *припустимого струму* і за *припустимими втратами* напруги:

$$I_{\text{пр.пр}} \geq I_{\text{розр}} \text{ і } I_{\text{пр.к}} \geq I_{\text{розр}}, \quad (10.6)$$

де $I_{\text{пр.пр}}$ і $I_{\text{пр.к}}$ – відповідно припустимий струм для провідника і кабелю;

$$S \geq \frac{200Pl \cdot 10^6}{\gamma \Delta U U_{\phi}^2}, \text{ мм}^2 \text{ – для лінії з двох проводів (фаза і нуль);} \quad (10.7)$$

$$S \geq \frac{100Pl \cdot 10^6}{\gamma \Delta U U_{\lambda}^2}, \text{ мм}^2 \text{ – для лінії з чотирьох проводів (три фази і нуль),} \quad (10.8)$$

де P – потужність споживача наприкінці лінії, Вт; l – довжина лінії, м; γ – питома провідність провідника, См/м; ΔU – припустима втрата напруги, %.

При визначенні перерізу кабелів великої довжини найбільш важливо дотримати умову припустимої втрати напруги.

10.2. ЕЛЕКТРИЧНЕ ОСВІТЛЕННЯ

Світло – це електромагнітне випромінювання.

Джерелами світла називають пристрої, що випромінюють електромагнітні хвилі видимого спектру від 0.38 до 0.77 мк.

Ці джерела можна розділити на дві основні групи: *природні й штучні*. Найважливішим природним джерелом світла є Сонце. Коли природнього освітлення немає або воно недостатнє, використовують штучні джерела світла. Та-

кими джерелами служать *лампи розжарення і газорозрядні лампи*.



Рис. 10.3–Лампа розжарення

Лампи розжарення. Джерелом світла в лампі розжарення (рис. 10.3) є тепла енергія нагрітої вольфрамової спіралі 2. Для зменшення інтенсивності процесу окислювання і розпилення спіралі лампи виконують або *вакуумними*, або з колбами 1, *заповненими інертним газом* – аргоном, криптоном та ін.

Лампи розжарення прості і за будовою, і в експлуатації, дешеві, не потребують застосування спеціальної пуско-

вої апаратури. Їхній істотний недолік – *відмінність спектра створюваного світла від денного і мала світловіддача*. Середня тривалість служби таких ламп близько 1000 год.

Люмінесцентні лампи. Люмінесцентні лампи світяться в результаті *електричного розряду в газовому середовищі*. Вони одержали найбільше поширення поряд з ртутними.

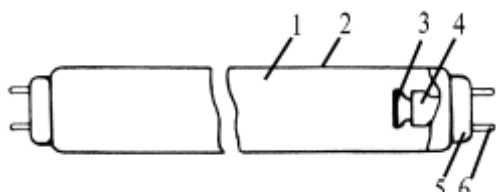


Рис. 10.4—Люмінесцентна лампа

Люмінесцентні лампи являють собою скляну трубку 1 (рис. 10.4), внутрішні стінки якої покриті *люмінофором* 2. Взаємодіючи з люмінофором, ультрафіолетове випромінювання перетворюється у видиме світло. Щоб зменшити розпилення електродів і полегшити виникнення електричного розряду, трубку заповнюють *інертним газом* (аргоном) або невеликою кількістю ртуті. Електроди покриті оксидним шаром, що дозволяє збільшити виділення електронів із поверхонь, які нагріваються. Кінці спіралей 3 зв'язані через ніжку 4 з цоколем 5 і струмовідводами 6. Для запалювання розряду використовують пускорегулюючу апаратуру.

Існує багато схем ввімкнення люмінесцентних ламп. Найпростіша і найбільш часто використовувана – *схема зі стартером* (рис. 10.5). Один з електродів стартера 9 виготовлений з біметалічної пластини. При вмиканні лампи *L* під впливом напруги *U* між електродами стартера виникає тліючий розряд, що приводить до їхнього розігріву. Біметалічний електрод стартера згинається і торкається до іншого електрода. Поки електроди торкаються, через спіралі проходить сильний струм, який нагріває їх до температури 1000°C . Виникає *термоелектронна емісія*, і газ у лампі іонізується. У цей час біметалічний електрод стартера охолоджується, повертається у вихідний стан і розриває коло. В той же момент у лампі виникає електричний розряд, і вона починає світитися. Дросель *Dr* виконує роль баластного опору і

Для запалювання розряду використовують пускорегулюючу апаратуру.

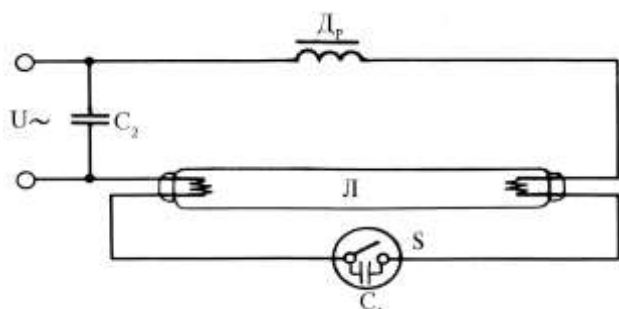


Рис. 10.5—Стартерна схема вмикання люмінесцентної лампи

Дросель *Dr* виконує роль баластного опору і

біметалічний електрод згинається і торкається до іншого електрода. Поки електроди торкаються, через спіралі проходить сильний струм, який нагріває їх до температури 1000°C . Виникає *термоелектронна емісія*, і газ у лампі іонізується. У цей час біметалічний електрод стартера охолоджується, повертається у вихідний стан і розриває коло. В той же момент у лампі виникає електричний розряд, і вона починає світитися. Дросель *Dr* виконує роль баластного опору і

сприяє виникненню електричного розряду. Конденсатор стартера C_1 служить для зменшення радіоперешкод, конденсатор C_2 призначений для компенсації реактивної потужності індуктивного навантаження дроселя.

Безпосереднє світлове випромінювання трубки дуже мале, але електричний розряд у ртутних парах є джерелом інтенсивного ультрафіолетового випромінювання (невидимого для ока), що в шарі люмінофора перетворюється у видиме світло.

Люмінесцентні лампи мають порівняно велику світловіддачу, малу яскравість і добру передачу кольору. Термін служби таких ламп складає 6000–7000 год. Основні недоліки: потреба в пускорегулюючій апаратурі і великі габаритні розміри трубок. Останнім часом набули поширення компактні люмінесцентні лампи з електронними пускорегулюючими апаратами. Ці лампи є енергоекономічними – при високій світловіддачі вони споживають меншу потужність, ніж лампи розжарювання.

Крім люмінесцентних, як джерела світла широко використовують ртутні, металогалогенні і натрієві лампи.

Освітлювальні пристрої. Для ефективного і якісного виконання освітлювальних пристроїв джерела світла звичайно використовують не самостійно, а в сполученні з освітлювальними приладами, які перерозподіляють світловий потік джерела світла, направляють його в потрібний бік, оберігають око людини від прямого потоку світла і захищають лампу від механічних пошкоджень, а також атмосферних впливів і пилу.

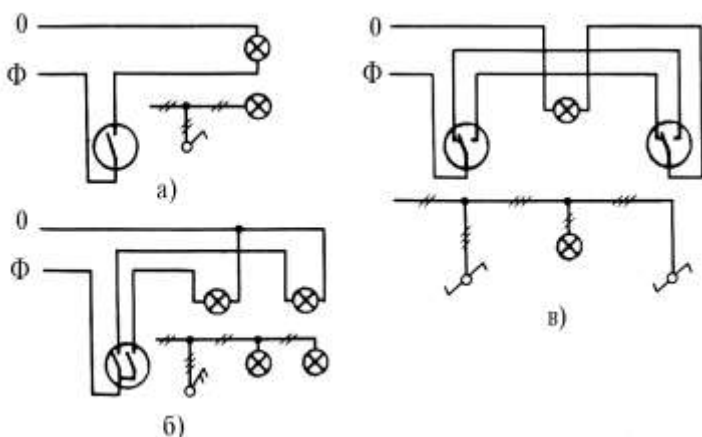


Рис. 10.6 – Схеми підключення ламп

Схеми підключення освітлювальних пристроїв залежать від числа ламп в одному або в одночасно ввімкнутих, а також від числа місць вмикання і вимикання. Для різних способів включення застосовують різні типи вимикачів. Для прикладу

на рис. 10.6 наведені різні схеми підключення ламп.

Для живлення джерел світла та інших споживачів електроенергії в будинках і виробничих приміщеннях споруджують спеціальні пристрої. Вони складаються з щитів і ліній.

Електричні щити бувають: головними, груповими, поверховими і квартирними. Залежно від їхнього призначення в них монтують апаратуру захисту, керування, виміру і сигналізації.

Електричні лінії, які відходять від щитів, бувають живильними, групо-

€ Рис. 10.6. -Схема вмикання ламп

Живильні лінії зв'язують головний щит із зовнішньою електричною мережею або груповими щитами. Групові лінії зв'язують групові щити безпосередньо з приймачами електроенергії. Вивідні лінії служать для приєднання до контактів і ламп (освітлювальних пристроїв).

На фазних провідниках живильних і групових ліній обов'язково встановлюють *запобіжники*. На нульовому провіднику запобіжники не встановлюють ні в якому разі.

Живлення електричних пристроїв у *житлових і виробничих будівлях* здійснюють від *розподільної мережі з напругою 380/220 В*.

10. 3. ДЕЩО ПРО ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКУ

Дія електричного струму на людський організм. Проходження електричного струму через тіло людини може привести до важких наслідків і навіть до смерті. Це залежить від багатьох факторів: сили струму, його частоти, шляху й тривалості його проходження через тіло людини, опору ділянок, через які проходить струм, і т. ін.

Опір тіла людини залежить від її фізичного й психічного стану, від навколишнього середовища й інших факторів і коливається в межах від 100 000 до 1000 Ом. У зв'язку з тим, що не можна передбачити стан людини й умови в момент її імовірного потрапляння під напругу, опір приймають рівним 1000 Ом.

Дія електричного струму на людський організм багатогранна: фізіологічна, термічна, хімічна й механічна. Вона виражається у впливі на нервову, серцеву й дихальну системи, у теплових і хімічних явищах (обгорання, опіки, розкладання крові) та ін.

Поразки електричним струмом поділяють на дві групи: електричний удар і електричні травми. Електричний удар пов'язують із ураженням внутрішніх органів, електричні травми – з ураженням зовнішніх органів.

Електричний струм може проходити через людське тіло різними шляхами, і його дія залежить від безлічі факторів, тому не можна провести точну границю безпечного і небезпечного струму. Зі зростанням його сили збільшується і його уражаюча дія. Струм силою до 50 мкА вважають безпечним. Струм силою більше 20–25 мА може привести до тяжких наслідків, включаючи смерть, а струм силою більше 100 мА є беззаперечно смертельним.

При тій самій напрузі постійний струм безпечніший струму промислової частоти. Зі збільшенням частоти понад 2000 Гц вражаюча дія змінного струму зменшується.

Розподіл електротехнічних пристроїв на пристрої низької напруги (до 1000 В) і пристрої високої напруги (понад 1000 В) не означає, що одні пристрої є безпечними, а інші – небезпечними. Насправді, якщо людина своїм тілом замикає коло при напрузі навіть у 220 В, то відповідно до закону Ома при опорі людського тіла 1000 Ом через нього проходить струм 0,22А. Струм такої сили смертельний.

Причини ураження електричним струмом. Найчастіше враження струмом відбувається при доторкуванні до неізольованих струмопровідних частин установок, пристроїв, які звичайно не перебувають під напругою, але в цей момент виявилися під напругою; при неприпустимому наближенні до споруд, що перебувають під високою напругою; при роботі (або неправильній експлуатації) з несправними електричними приладами й інструментами.

Не слід забувати, що кожен електричний апарат, машина або пристрій, що перебуває під напругою, є джерелом небезпечного електричного струму.

Захист заземленням і зануленням. Способи захисту від враження електричним струмом численні й різні за видом. Їх вибір залежить від конкретних експлуатаційних умов.

Найчастіше використовують (як найбільш ефективні) захист заземленням і зануленням, коли навмисно приєднують до землі або до заземленого нульового провідника провідні елементи пристрою, які за нормальних обставин, не перебувають під напругою, але можуть стати провідниками струму у випадку пробією ізоляції або з інших причин.

До таких елементів, в основному, відносяться металеві корпуси двигунів й апаратів, металеві конструкції інших електричних пристроїв. Створення кола з малим опором забезпечує проходження великого струму. Від нього захист швидко спрацьовує й відключає ушкоджену ділянку.

Захист заземленням застосовують, в основному, в мережах з напругою понад 1000 В, а захист зануленням - у мережах низької напруги 380/220 В.

Як було сказано раніше, занулення виконують в мережі з чотирма провідниками і замкненою нейтраллю, з якою з'єднаний нульовий провідник.

Без нульового провідника неможливо забезпечити ефективну безпеку. Занулення металевих неструмопровідних елементів електричних споруд обов'язкове. В особливо небезпечних умовах (вологе або мокре середовище) як додатковий захід можна використати заземлення, але воно не замінює занулення.

Для безпечної роботи рухомих споживачів їх підключають до електричної мережі через контакт із зануленим затиском. Цей захисний затиск з'єднують із нульовим провідником. Живлення рухомих споживачів здійснюється кабелем, де одна з жил використовується для зв'язку металевого корпусу споживача із зануленим затиском. У сучасних побутових розетках також передбачається нульовий контакт. Крім того, в побуті і в громадських закладах для захисту від ураження електричним струмом застосовуються пристрої записного вимикання (ПЗВ), які відключають установку від живлення в разі погіршення ізоляції чи доторкування до частин, що знаходяться під напругою.

Надання першої допомоги потерпілим від електричного струму. Своєчасна й правильно надана перша допомога має першорядне значення для потерпілого від враження електричним струмом. По-перше, необхідно якнайшвидше відключити струм, що проходить через людське тіло. Для цього відключають напругу, зрізуючи проводи ізольованим інструментом, створюючи коротке замикання або в інший спосіб. Якщо потерпілий не проявляє ознак життя або дихає дуже рідко, необхідно негайно приступити до виконання штучного дихання. При відсутності в потерпілого пульсу проводиться закритий масаж серця. Одночасно необхідно викликати швидку медичну допомогу. Імовірність порятунку тим вища, чим швидше буде надано допомогу.

Якщо потерпілий дихає, не перебуває у важкому стані, необхідно розстебнути одяг, винести його на свіже повітря й все одно обов'язково викликати лікаря.

Електричний струм – величезне досягнення людства, але він потребує великої уваги. Боятися електричного струму не слід, а поважати його необхідно обов'язково. Тільки в цьому разі він буде вашим вірним слугою.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Підручник. – Львів : Афіша, 2001. – 424 с.
2. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка і мікросхемотехніка: Під ред. А. Г. Соскова. Вид. 2-е, виправл. і доповн.– Харків: ХДАМГ, 2003 – 281 с.
3. Теорія електропривода: Підручник/ М. Г. Попович, М.Г. Борисик, В.А. Гаврилюк та ін. За ред. М.Г. Поповича. – К. : Вища шк., 1993. –454 с.
4. Клауснітцер Г. Введение в электротехнику: Пер. С нем. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 480 с.
5. Руденко В. С., Ромашко В. Я., Трифонюк В. В. Промислова електроніка – К : Либідь, 1993. – 432 с.
6. Веников В.А., Путятин Е.В. Введение в специальность.: Учеб. пособие для вузов. М. : Высш. шк., 1978 – 294 с.
7. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. Учеб. для вузов. – 6-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 1999 – 542 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Рогачов Олександр Іванович,
Гаряжа Василь Миколайович

Конспект лекцій
з курсу

«Вступ до спеціальності»

(для студентів 1 курсу денної та заочної форм навчання
за напрямом 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»
спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»)

Відповідальний за випуск доц. *В. М. Ковальов*

Редактор *О. Ю. Кригіна*

Комп'ютерне верстання *Н. В. Зражевська*

План 2010, поз. 94 Л

Підп. до друку 25.11.2010 р.

Формат 60×84/16

Друк на ризографі.

Ум.-друк. арк. 4,5

Тираж 250 пр.

Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@hsame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.