

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ:
курс лекцій з навчальної дисципліни**

Запоріжжя 2026



УДК 621.313 (072)
Е50

Рекомендовано Науково-методичною радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 7 від 04.06.2026 р.)

Укладач

Шрамко Ю.Ю. канд. техн. наук, викладач циклової комісії з гірництва та електроінженерії

Е50 Електричні машини та основи електроприводу : курс лекцій з дисципліни / уклад. Ю. Ю. Шрамко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026. 291 с.

УДК 621.313+622+669 (072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ТЕМА 1. ВСТУП ДО КУРСУ. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	5
ТЕМА 2. ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	32
ТЕМА 3. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	49
ТЕМА 4. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРАНСФОРМАТОРИ	73
ТЕМА 5. РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ТРАНСФОРМАТОРА	88
ТЕМА 6. ПАРАМЕТРИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ТРАНСФОРМАТОРА	101
ТЕМА 7. ТРИФАЗНІ ТРАНСФОРМАТОРИ ТА ЇХ ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА.....	117
ТЕМА 8. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ	137
ТЕМА 9. КОНСТРУКЦІЯ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ	165
ТЕМА10. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	177
ТЕМА11. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ	193
ТЕМА12. СИНХРОННІ ГЕНЕРАТОРИ.....	203
ТЕМА13. СИНХРОННІ ДВИГУНИ.....	223
ТЕМА14. КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ.....	232
ТЕМА15. КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНОЇ АПАРАТУРИ	247
ТЕМА16. ТИПОВІ ВУЗЛИ СХЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗМІННОГО ТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	257
ТЕМА17. ТИРИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ.....	278
ТЕМА18. РІВНЯННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ. СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ	285

ВСТУП

Електричні машини є одними з найважливіших елементів сучасних електротехнічних комплексів. Вони забезпечують перетворення електричної енергії в механічну, механічної — в електричну, а також зміну параметрів електричної енергії за допомогою трансформаторів. Від правильного вибору, налагодження, експлуатації та технічного обслуговування електричних машин значною мірою залежать надійність роботи виробничого обладнання, енергоефективність технологічних процесів, безпека персоналу та стабільність функціонування електромеханічних систем.

У конспекті розглянуто машини постійного струму, трансформатори, асинхронні та синхронні машини, а також базові питання електроприводу й систем керування електроприводами. Особливу увагу приділено фізичним процесам, що відбуваються в електричних машинах, їхнім основним рівнянням, характеристикам, режимам роботи, способам пуску, регулювання швидкості, гальмування та умовам ефективної експлуатації.

Структура конспекту побудована за принципом послідовного переходу від загальних положень електромеханіки до вивчення окремих типів електричних машин і систем електроприводу. Спочатку розглядаються базові закони електромеханічного перетворення енергії, будова та принцип дії машин постійного струму. Далі подано матеріал щодо трансформаторів, їхніх режимів роботи, параметрів, трифазних схем і паралельної роботи. Наступні теми присвячені машинам змінного струму, асинхронним та синхронним машинам, їхнім характеристикам і практичному застосуванню. Завершальна частина охоплює питання класифікації, побудови та функціонування систем автоматичного керування електроприводами.

Метою вивчення дисципліни є формування у здобувачів освіти знань і практично орієнтованих умінь, необхідних для розуміння роботи електричних машин та електроприводів, аналізу їхніх характеристик, оцінювання режимів роботи, вибору обладнання відповідно до умов експлуатації, а також для подальшого опанування спеціальних дисциплін електромеханічного й автоматизованого спрямування.

У результаті опрацювання конспекту здобувачі освіти повинні вміти пояснювати принцип дії основних типів електричних машин, визначати їхні конструктивні елементи та функціональне призначення, аналізувати режими роботи, користуватися основними рівняннями та характеристиками, обґрунтовувати вибір електродвигунів і трансформаторів для типових виробничих умов, а також розуміти принципи побудови систем керування електроприводами.

Конспект лекцій може бути використаний під час аудиторної роботи, самостійного опрацювання навчального матеріалу, підготовки до практичних і лабораторних занять, виконання індивідуальних завдань, а також для підготовки до поточного та підсумкового контролю знань. Його зміст орієнтований на поєднання теоретичних основ із прикладними аспектами майбутньої професійної діяльності фахівців у сфері електротехніки, електромеханіки та промислової автоматизації.

ТЕМА 1. ВСТУП ДО КУРСУ. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Предмет, мета та задачі курсу, зв'язок з іншими дисциплінами. Базові закони електромеханіки. Найпростіші генератор і електродвигун постійного струму. Будова та принцип дії колекторних машин постійного струму (МПС). Сфери застосування електричних машин постійного струму. Електрорушійна сила (ЕРС), електромагнітний момент та принцип зворотності електричних машин постійного струму. Робота МПС при навантаженні. Обмотки якоря. Реакція якоря МПС та її вплив на магнітний потік машини. Компенсаційна обмотка. Комутація МПС. Природа щіткового контакту та причини іскріння. Способи поліпшення комутації. Висновки.

Основні визначення, класифікація електричних машин

Розвиток електричних машин (ЕМ) базується на фундаментальних наукових відкриттях XIX століття. Важливими етапами стали дослідження Г. Ерстеда, який у 1820 р. встановив магнітну дію електричного струму, а також роботи М. Фарадея, котрий у 1822 р. показав можливість безперервного електромагнітного обертання, а у 1831 р. сформулював основи явища електромагнітної індукції.

Вагомий внесок у розвиток теорії електричних машин зробив Е. Ленц, який у 1833 р. обґрунтував принцип оборотності електричних машин, тобто здатність однієї й тієї самої машини працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Практична реалізація цієї ідеї пов'язана з роботами Б. Якобі, який у 1834 р. створив перший електродвигун з обертовим валом.

Еволюція систем змінного струму відбувалася поступово. На початковому етапі розвитку електротехніки перевага надавалася системам постійного струму, однак подальший технічний прогрес був пов'язаний із впровадженням змінного струму. Важливу роль у цьому відіграли роботи П. Яблочкова, зокрема створення трансформатора у 1876 р. та прототипу синхронної машини у 1878 р. Остаточне утвердження змінного струму в енергетиці пов'язують із працями М. Доливо-Добровольського, який у 1889 р. запропонував комплексну трифазну систему, включно з конструктивно простим і надійним асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором.

Сучасний розвиток електричних машин спрямований переважно за двома основними напрямками:

- зменшення матеріаломісткості, тобто зниження маси та габаритів машини на одиницю потужності;
- підвищення експлуатаційної надійності та збільшення строку служби обладнання.

На шляху від джерела генерації до кінцевого споживача електрична енергія неодноразово проходить етапи перетворення параметрів. Саме

тому трансформаторне обладнання залишається одним із ключових елементів сучасних електричних мереж.

Класифікацію ЕМ за родом струму та конструктивним виконанням подано на рис. 1.1.

Основні закони електромеханіки

Оснoву роботи будь-якої ЕМ складають три закони електродинаміки: – закон електромагнітної індукції; – закон електромагнітних сил; – закон повного струму.

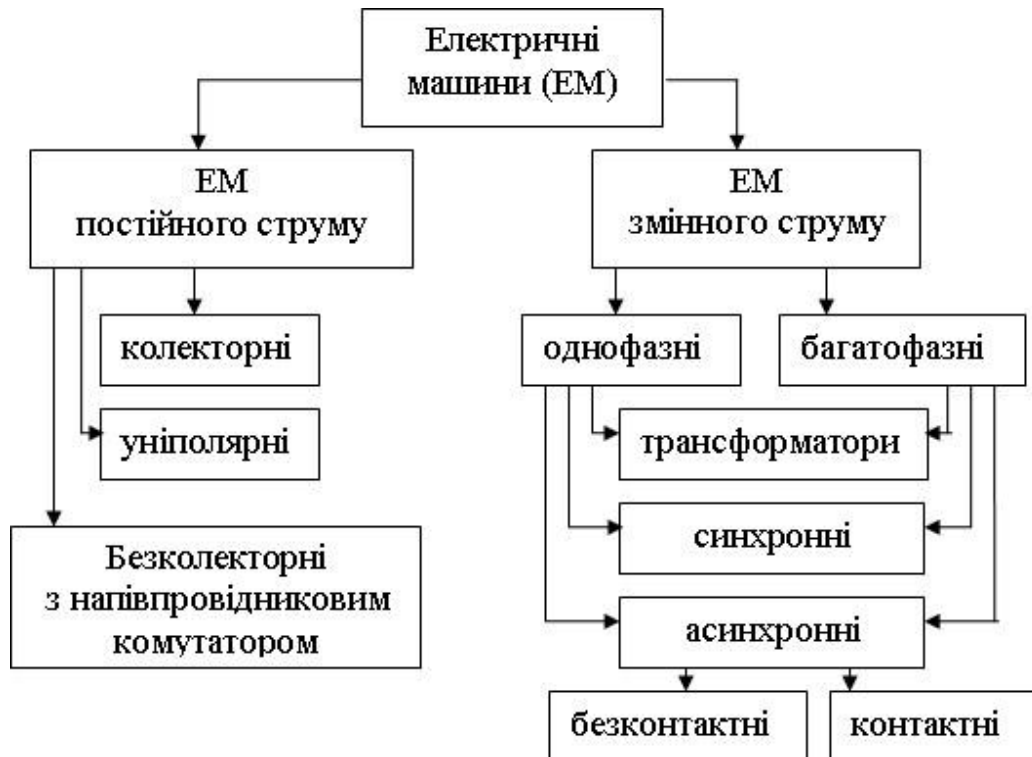


Рисунок 1.1 - Класифікація ЕМ за родом струму та конструктивним виконанням

Закон електромагнітної індукції

Закон Фарадея описує процес виникнення електрорушійної сили (ЕРС) в обмотках ЕМ. Відповідно до цього закону, за будь-якої зміни магнітного потоку, зчепленого з контуром провідника, у ньому індукується ЕРС.

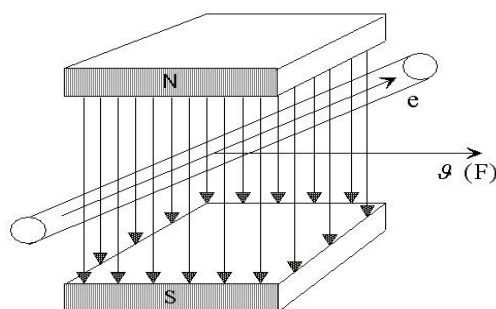


Рисунок 1.2 - Процес наведення електрорушійної сили (ЕРС) в обмотках ЕМ

Отже, будь-яка ЕМ має містити дві основні частини: систему створення електромагнітного поля та систему провідників, у яких індукується ЕРС. Напрямок індукованої ЕРС є таким, що створюваний нею струм протидіє зміні магнітного потоку, зчепленого з контуром.

Напрямок індукованої ЕРС визначають за правилом правої руки (рис. 1.2). Якщо праву руку розмістити так, щоб магнітні силові лінії входили в долоню, а відігнутий великий палець спрямувати за напрямом руху провідника відносно магнітного поля, то чотири пальці покажуть напрям ЕРС, індукованої у провіднику.

Величина ЕРС, індукованої у провіднику, дорівнює першій похідній числа потокозчеплення з контуром провідника, тобто

$$E = - \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

Потокозчеплення (Ψ) контуру є функцією двох змінних: простору (x) та часу (t), тобто $\Psi = f(x, t)$, індукована ЕРС може виникати як у непорушному замкнутому контурі при зміні в часі ($-\frac{\partial \Psi}{\partial t}$) зчепленого з ним магнітного потоку (називається трансформаторною ЕРС), так і при переміщенні контуру у магнітному полі ($-\frac{\partial \Psi}{\partial t} v_a$), постійному в часі (називається ЕРС обертання). У трансформаторах зустрічається виключно трансформаторна ЕРС, у ЕМ – головним чином ЕРС обертання (у деяких випадках і ЕРС трансформації). (v_a – швидкість переміщення контуру у магнітному полі).

Будемо переміщати провідник між двома полюсами. Для цього прикладемо зовнішню силу F . Напрямок ЕРС, що наводиться у провіднику, визначиться за правилом правої руки.

Закон електромагнітних сил

Коли через провідник, що знаходиться в магнітному полі, проходить електричний струм, на нього починає діяти механічна сила.

- У **генераторах** ця сила діє проти напрямку руху, створюючи гальмівний момент, який долає первинний двигун.
- У **двигунах** ця сила є рушійною, вона створює обертовий момент, який змушує вал обертатися.

Через провідник з опором R_n тече струм, співпадаючий за напрямком із індукованою ЕРС (рис. 1.3).

В результаті взаємодії струму у провіднику та магнітного поля виникне електромагнітна сила

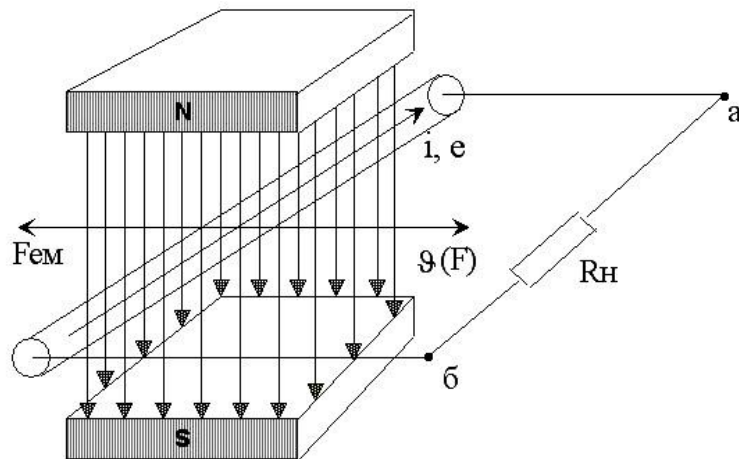


Рисунок 1.3 - Правило лівої руки

Напрямок цієї сили визначають за правилом лівої руки (рис. 1.3). Якщо ліву руку розмістити так, щоб магнітні силові лінії входили в долоню, а чотири пальці спрямувати за напрямом струму в провіднику, то відігнутий під прямим кутом великий палець покаже напрям дії електромагнітної сили F_{em} .

Принцип оборотності ЕМ

При рівномірному русі, тобто при $\vartheta = const$, зовнішня сила (F) врівноважується електромагнітною силою (F_{em}), таким чином $F = F_{em}$.

$$F\vartheta = F_{em}\vartheta = iB_x l_{пр}\vartheta = ei$$

видно, що механічна потужність ($F\vartheta$) перетворюється у електромагнітну (ei).

Скористуємося другим законом Кірхгофа для замкнутого контуру та отримаємо рівняння електричної рівноваги для генератора $e = u + ir$, або $u = e - ir$. Якщо позначити через R_a – опір обмотки ЕМ, I_a - струм якоря, E_a - ЕРС обмотки якоря, U - напругу на затисках ЕМ, то дістаємо рівняння електричної рівноваги генератора у вигляді

$$U = E - I_a R_a.$$

Помноживши обидві частини рівняння на струм якоря I_a , дістаємо

$$UI_a = EI_a - I_a^2 R_a.$$

де UI_a - потужність, що одержує споживач;

EI_a - електромагнітна потужність (P_{em});

$I_a^2 R_a$ - втрати у обмотці якоря генератора.

Таким чином, для ЕМ у режимі генератора отримуємо рівняння

$$UI_a = EI_a - I_a^2 R_a.$$

тобто механічна потужність ($P_{мех} = F\vartheta$) перетворюється у електромагнітну ($P_{em} = EI_a$). При цьому:

- потужність, що одержує споживач (UI_a), менше від цієї потужності на величину втрат у генераторі ($I_a^2 R_a$);
- при роботі генератора у якорі протікає струм, виникають електромагнітні сили, що виявляють гальмуючу дію.

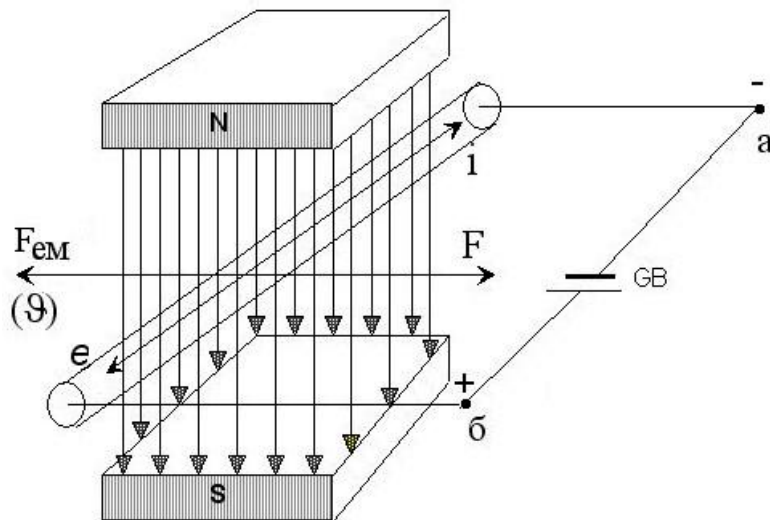


Рисунок 1.4 - Модель з правилом правої руки

Заберемо з моделі опір навантаження та підключимо джерело постійного струму так, щоб струм зберіг свій напрямок (рис. 1.4).

За умови, що електромагнітна сила (F_{em}) врівноважується механічною силою (F) і при $\vartheta = const$ тобто електромагнітна потужність перетворюється у механічну потужність.

Напрямок ЕРС, індукованої у провіднику при русі його під дією сили F_{em} струму. Рівняння електричної рівноваги для електричного кола, зображеного на рис. 1.4,

$$u - e_a = i_a R_a,$$

звідки рівняння рівноваги для двигуна

$$U = E_a + I_a R_a$$

Якщо виконати такі перетворення:

$$UI_a = EI_a + I_a^2 R_a.$$

та

$$EI_a = UI_a - I_a^2 R_a.$$

то дістаємо, що для електричного двигуна:

- електрична потужність, що підводиться (UI_a), не повністю перетворюється у електромагнітну (EI_a);
- при однаковому напрямі струму (I_a) обертання генератора та двигуна різні.

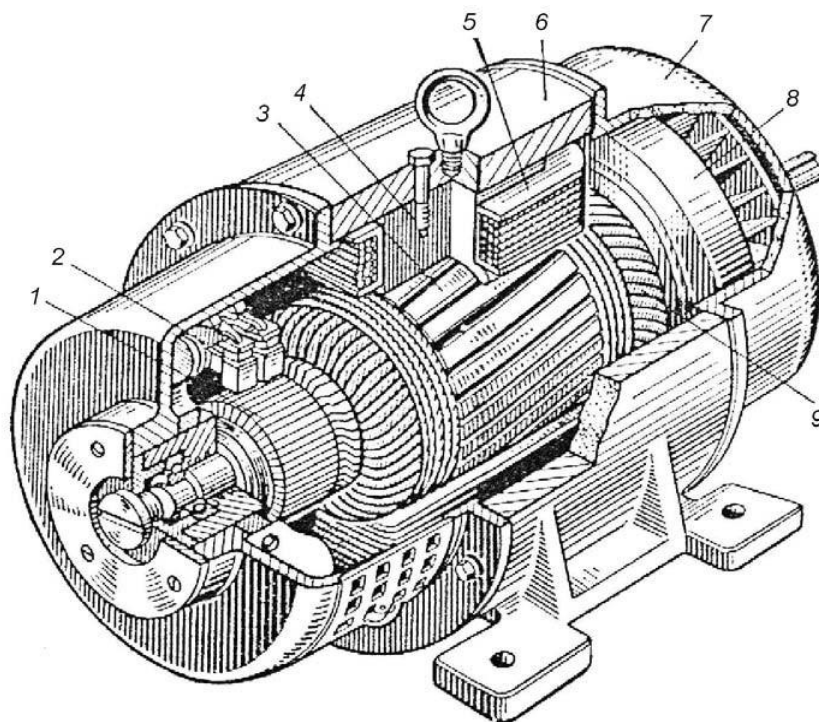
Розглянуті режими показують принцип оборотності електричних машин, що був встановлений Ленцем у 1833 р. Його можна застосувати до будь-якої електричної машини.

Будова машини постійного струму

Елементи конструкції машин постійного струму

Попри окремі конструктивні відмінності складальних одиниць і деталей, загальна будова машин постійного струму (МПС) є типовою. Основним різновидом МПС є колекторна машина, характерною ознакою якої є наявність колектора на валу. Машина постійного струму складається з

індуктора, якоря, колектора, щіткового апарата та підшипникових щитів (рис. 1.5).



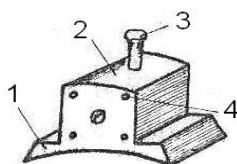
1 – колектор; 2 – щітка; 3 – осердя якоря; 4 – головний полюс; 5 – котушка обмотки збудження; 6 – станина (корпус); 7 – підшипниковий щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

Рисунок 1.5 - Будова машини постійного струму:

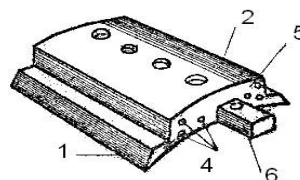
Станина (рис. 1.5) призначена для кріплення полюсів і підшипникових щитів. Водночас вона є частиною магнітного кола, оскільки через неї замикається магнітний потік машини.

Тому станину виготовляють зі сталі, яка поєднує достатню механічну міцність із високою магнітною проникністю. У МПС великої потужності станина може бути рознімною, а в машинах малої потужності її часто виконують у вигляді відрізка труби.

Головні полюси (рис. 1.6) виконують шихтованими зі сталевих штампованих листів завтовшки 1÷2 мм або з листів електротехнічної сталі.



а)



б)

Рисунок 1.6 - Головні полюси

Сталеві листи спресовують і скріплюють заклепками (4), головки яких втоплені в натискні щоби (1), установлені на торцях полюса. Полюси

закріплюють на станині болтами (3). Різьбу під болти виконують безпосередньо в осерді полюсів (рис. 1.6,а) або у сталевих стержнях (6), вставлених в отвори, виштамповані в листах полюсів (рис. 1.6,б).

Магнітне поле в МПС створюється намагнічувальною силою обмотки збудження (рис. 1.7,а), яку виконують у вигляді полюсних котушок 2, розміщених на осерді 1 полюсів. Кількість котушок збудження залежить від способу збудження машини.

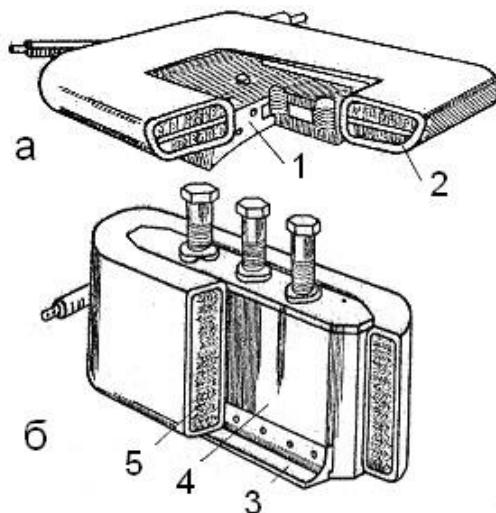


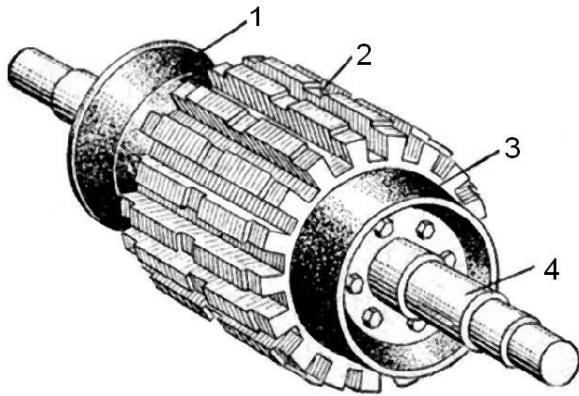
Рисунок 1.7 - Обмотка збудження (а) та додатковий полюс (б).

У машинах великої потужності, понад 100 кВт, а також у МПС, призначених для роботи з різко змінним навантаженням, на полюсних наконечниках виконують пази. У ці пази укладають компенсаційну обмотку, яку вмикають послідовно в коло якоря.

Додаткові полюси (рис. 1.7,б) застосовують для зменшення іскріння під щітками. Це запобігає підгорянню колектора та виникненню на його поверхні так званого «кругового вогню». Як правило, додаткові полюси виготовляють суцільними зі сталі. Їх розміщують посередині між головними полюсами та кріплять до станини болтами. Форма додаткового полюса 4 і спосіб кріплення обмотки 3 визначаються потужністю машини.

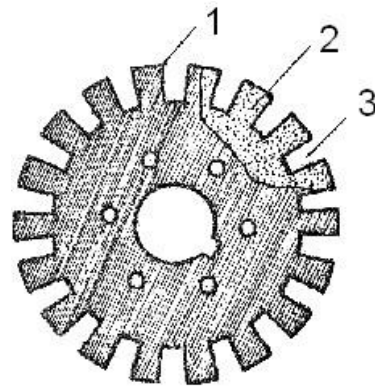
Якщо додатковий полюс має шихтовану конструкцію, технологія його складання аналогічна технології виготовлення головних полюсів. На полюсі розміщують обмотку 5 додаткових полюсів, яку вмикають послідовно з обмоткою якоря. Обмотки головних (рис. 1.7,а) і додаткових (рис. 1.7,б) полюсів виготовляють із мідного проводу. Конструкція обмоток, тип проводу (круглий, прямокутний) залежить від потужності машини та способу збудження.

Якір МПС (рис. 1.8) складається з валу, осердя і колектора. Пакет якоря набирається із штампованих листів електротехнічної сталі (рис. 1.9).



1, 3 – обмоткотримач; 2 – бандажні канавки; 4 – вал

Рисунок 1.8 - Осердя якоря



1 – зубець; 2 – ізоляція; 3 – паз

Рисунок 1.9 - Лист якоря

Застосовується холоднокатана ізотропна сталь марок 2013, 2312 та інших завтовшки 0,5 (0,35) мм, якість якої не залежить від напрямку прокату. На зовнішній поверхні листів штампуються пази 3 для укладки обмотки якоря, форма яких визначається потужністю машини. Листи осердя ізолюються з двох боків тонкою плівкою лаку 2, або оксидною плівкою. Зібрані у загальний пакет листи насаджують на вал і закріплюють на ньому за допомогою натискних шайб.

Шихтована конструкція пакета якоря дозволяє зменшити втрати енергії від вихрових струмів, що виникають при обертанні якоря у магнітному полі. Для поліпшення охолодження у осерді якоря можуть виконуватися аксіальні вентиляційні канали. У машинах великої потужності, при довжині якоря більшій, ніж 35 см, осердя набирається з окремих сталевих пакетів завтовшки 4÷6 см із влаштуванням між ними радіальних каналів завширшки 1 см.

Колектор МПТ (рис. 1.10, 1.11) збирається з клиноподібних пластин 4 холоднокатаної (колекторної) міді, ізольованих одна від одної прокладками з колекторного міканіту 3.

За способом кріплення пластин та ізоляції розрізняють колектори зі сталевим конусом і втулкою (рис. 1.10) та колектори на пластмасі (рис. 1.11).

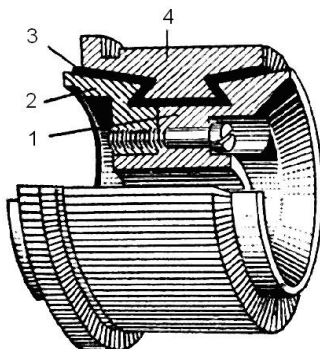


Рисунок 1.10 - Колектор з сталевим конусом

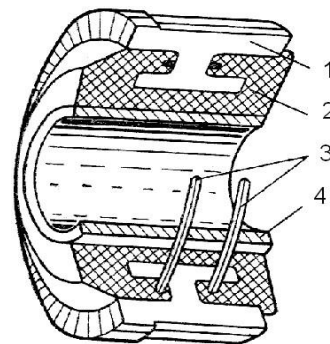


Рисунок 1.11 - Колектор на пластмасі

При арочному способі кріплення сталевим конусом зусилля передається від корпусу 1 та натискного фланця 2 на внутрішню поверхню ластівчиного хвоста колекторних пластин, тому при ослабленні тиску між пластинами їх можна підпресувати.

Обмотка якоря виконується з мідного проводу круглого або прямокутного перетину і складається з окремих секцій, кінці яких припаюються до шпυльок колектору. Обмотка виконується двошаровою. Одна сторона секції (називається пряма) розміщена у верхньому шарі, друга (зворотна) – у нижньому. Між шарами встановлюють додаткову (міжшарову) ізоляцію. Крім того, в паз вкладається корпусна ізоляція, що ізолює обмотку від сталі якоря та запобігає механічним ушкодженням обмотки. Для закріплення обмотки у пазах використовують клини (дерев'яні, гетинаксові, текстолітові) або бандажі зі склострічки або сталевого дроту (у машинах великої потужності). Крім того лобові частини обмотки кріплять бандажами до обмоткотримача (рис. 1.8).

Щітковий апарат (рис. 1.12,а) складається з траверси, щіткових пальців (болтів) та щіткотримачів (рис. 1.12,б).

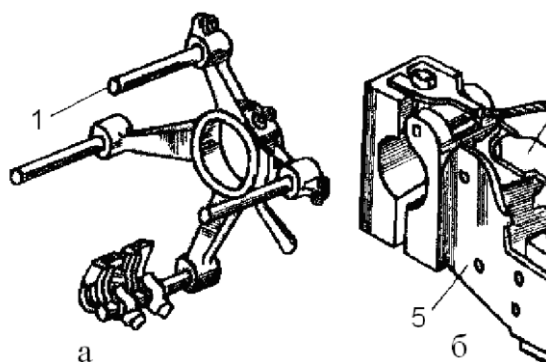


Рисунок 1.12 - Щітковий апарат

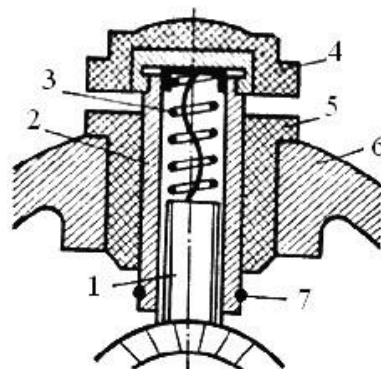


Рисунок 1.13 - Щіткотримач машин малої потужності

Траверса використовується для кріплення на її щіткових пальцях 1 щіткотримачів. Траверса кріпиться до підшипникового щиту. Для точного настроювання комутації (фіксації щіток у певному положенні) траверса допускає поворот. Щіткотримач (рис. 1.12,б) складається з обойми 5 і натискного приладу 2, що забезпечує примикання щітки до колектору із певним зусиллям. Щіткотримач машин малої потужності (рис. 1.13) розташовується у підшипниковому щиті 6 і містить щітку 1, обойму 2, пружину 3, ковпак 4, ізоляційну втулку 5, затискач для вивідного провідника 7.

Щітка (рис. 1.14) являє собою прямокутний брусок 1, виконаний на основі графіту (графітні, мідно-графітні).

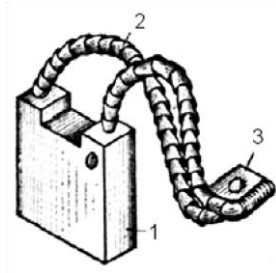


Рисунок 1.14 - Щітка машини постійного струму

Щітка характеризується величиною щільності струму під нею і падінням напруги у щітковому контакті. Щітка споряджена гнучким мідним канатиком 2, один кінець якого армірований у щітку, а другий споряджений наконечником 3 для приєднання до щіткового апарата. Натиснення ($0,02 \div 0,04$ МПа) повинно бути відрегульовано для всіх щіток.

Підшипникові щити (див. рис. 1.5) є з'єднувальними деталями між станиною і якорем, а також опорною конструкцією для якоря, вал якого обертається в підшипниках, встановлених у щитах. Конструкція підшипникових щитів визначається потужністю машини, умовою її кріплення на місці експлуатації.

Призначення колектора

Генератор постійного струму

Припустимо, що якір генератора постійного струму (ГПС), наведений на рис. 1.15,а є прямокутним контуром, що переміщується в магнітному полі з лінійною швидкістю v за годинниковою стрілкою.

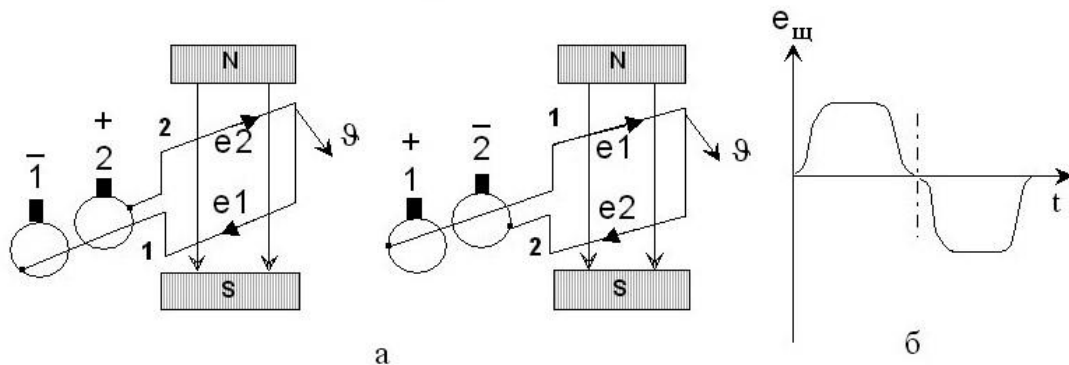


Рисунок 1.15 - Якір генератора постійного струму

Контур підімкнений до двох кілець. Якщо визначити за правилом правої руки напрямок ЕРС у провідниках 1, 2 секцій для двох їх положень (рис. 1.15,а), то на щітках можна спостерігати зміну у часі ЕРС секції (рис. 1.15,б).

Якщо контур підімкнений до двох півкілець (рис. 1.16,а) (схематичне зображення колектора), то на щітках буде пульсуюча ЕРС (рис. 1.16,б).

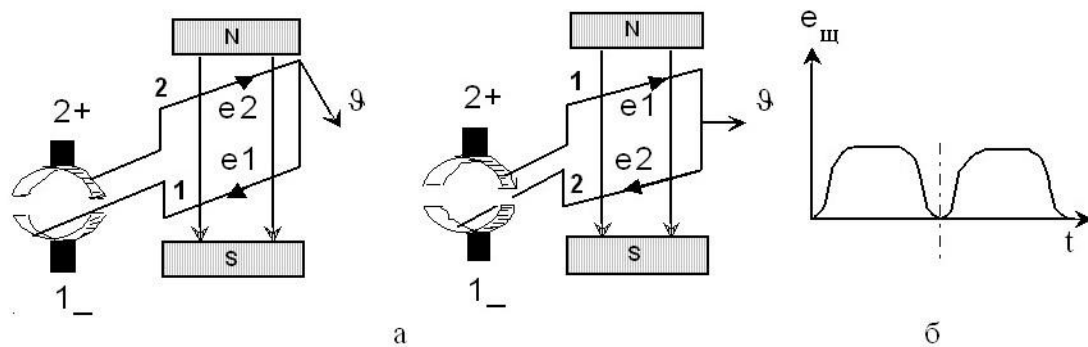


Рисунок 1.16 - Схематичне зображення колектора генератора постійного струму

Таким чином, у ГПС колектор виконує функції механічного випрямляча змінної ЕРС обмотки якоря.

Двигун постійного струму

Якщо двигун постійного струму (ДПС) під'єднати до джерела постійного струму через кільця (рис. 1.17) і за правилом лівої руки визначити напрям електромагнітної сили, що діє на провідники 1 і 2 секції обмотки (рис. 1.17,а), то після повороту на 180° напрям цієї сили зміниться на протилежний. Унаслідок цього рамка здійснюватиме коливальний рух доти, доки провідники 1 і 2 не розмістяться на лінії, перпендикулярній до осі полюсів, де індукція магнітного поля дорівнює нулю.

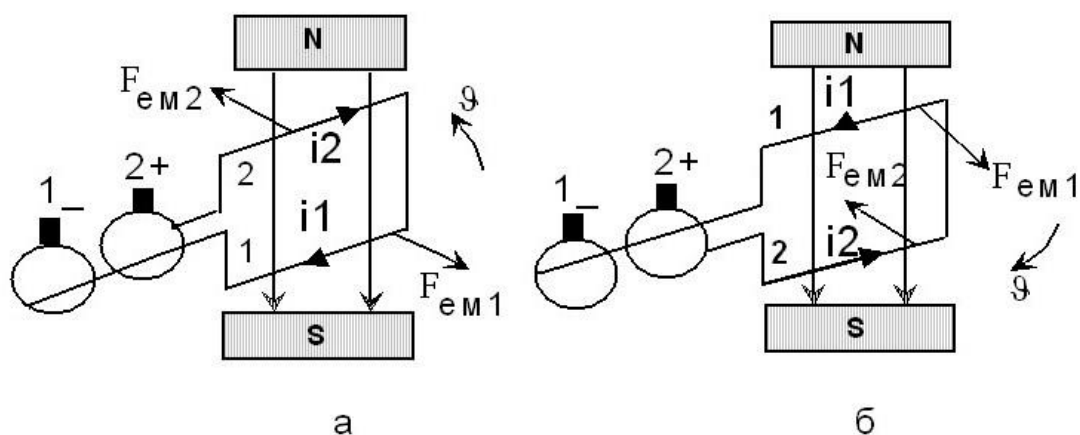


Рисунок 1.17 - Якір двигуна постійного струму

Якщо провідники 1 і 2 секції обмотки під'єднати до двох півкілець (рис. 1.18), напрям електромагнітної сили, що діє на ці провідники, не змінюється. Це забезпечує обертання рамки в магнітному полі.

Отже, у ДПС колектор змінює напрям струму в секціях обмотки якоря під час їх переходу під полюси різної полярності, тобто виконує функцію інвертора.

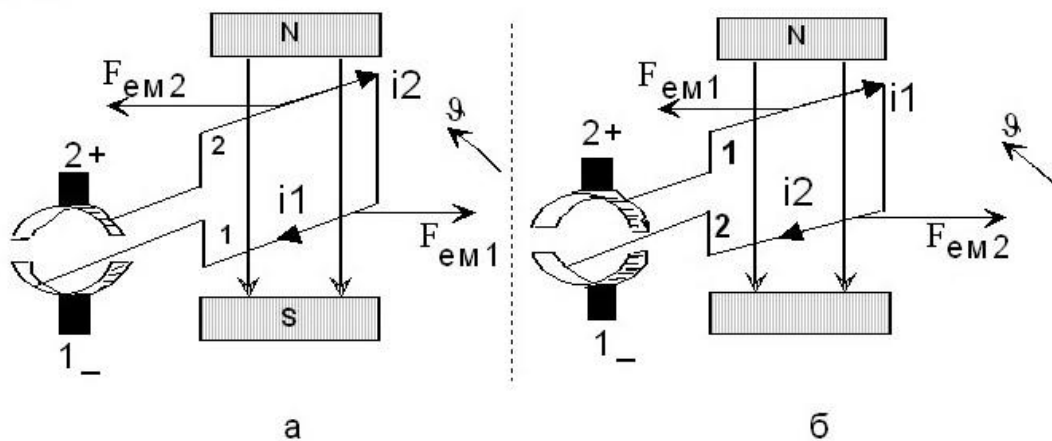


Рисунок 1.18 - Схематичне зображення колектору двигуна постійного струму

Обмотки якоря

Вимоги до обмоток

Обмотка якоря (ОЯ) є найважливішим елементом МПС. Вона повинна задовольняти такі вимоги: обмотка повинна бути розрахована на задані величини напруги та струму навантаження; обмотка повинна мати достатню електричну, механічну та термічну стійкість; конструкція ОЯ повинна забезпечувати задовільні умови зняття струму з колектора; витрати матеріалу на ОЯ повинні бути мінімальними; технологія виготовлення ОЯ повинна бути по можливості простою.

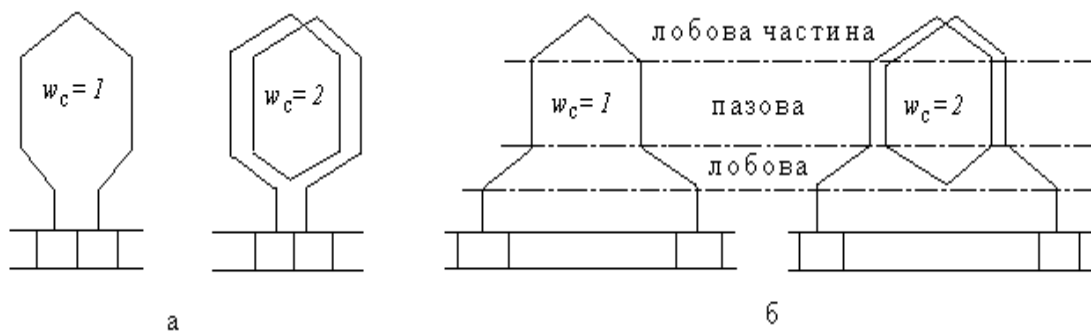
Елементи обмотки якоря

Виток – сукупність двох провідників (прямого та зворотного), розташованих на відстані, що приблизно дорівнює полюсному діленню.

Секція – один ($W_c=1$) або декілька ($W_c>1$) витків, з'єднаних послідовно та приєднаних до двох колекторних пластин. За конфігурацією розрізняють петльову (рис. 1.19,а) та хвильову секції обмотки якоря (ОЯ) (рис. 1.19,б).

Котушка – частина ОЯ, яка складається із секцій, що розташовані в одному пазу та мають спільну ізоляцію відносно сталі якоря.

Обмотки є котушкові та стержневі. Секції котушкових обмоток намотуються провідниками круглого перетину беззупинно з W_c витків. Стержневі обмотки виконуються з жорстких половин секцій, з'єднаних у лобових частинах пайкою. Половини секції виконуються з прямокутних провідників. Для зручного розміщення лобових частин ОЯ виконується двошаровою (рис. 1.20). При цьому одна сторона секцій розташовується у верхньому шарі, друга – у нижньому.



а – петльова; б – хвильова
Рисунок 1.19 - Секції ОЯ

Під елементарним пазом розуміється паз, по ширині якого розташовується один провідник ($U_{\Pi}=1$). Така структура застосовується рідко, тому що видаток пазової ізоляції дуже великий та зубці недостатньо стійкі у механічному відношенні. Тому на практиці ОЯ виконують з $U_{\Pi} > 1$. На рис. 3.2 показані структури паза якоря за різних U_{Π} , w_c та кількості елементарних провідників у ефективному – $n_{\text{ел}}$.

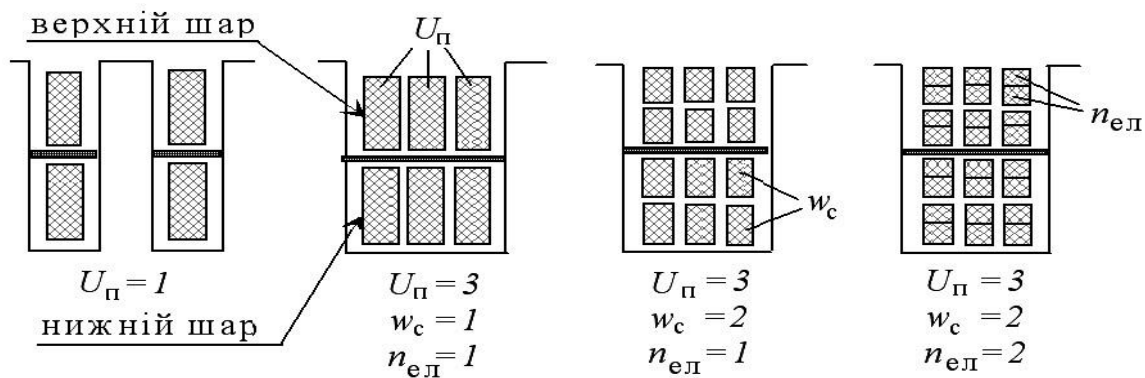


Рисунок 1.20 - Розташування секцій ОЯ у пазу МПС

Секції ОЯ з'єднуються послідовно так, що початок наступної секції та кінець попередньої приєднуються разом до однієї колекторної пластини (рис. 1.21).

Оскільки секція має 2 кінці та до кожної колекторної пластини приєднуються 2 кінці, то кількість секцій (S) дорівнює кількості колекторних пластин (K), тобто $S = K$. Якщо у МПС існує Z пазів якоря (реальних) та у кожному пази по його ширині розміщено U_{Π} секційних сторін, то кількість елементарних пазів якоря

$$Z_e = U_{\Pi} Z = S = K.$$

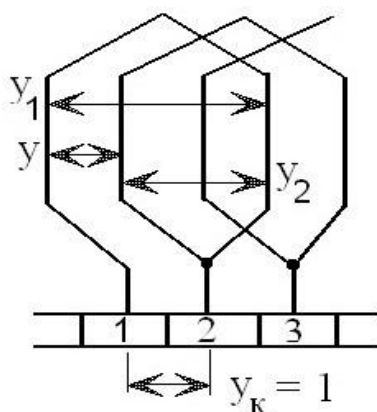


Рисунок 1.21 - З'єднання секцій

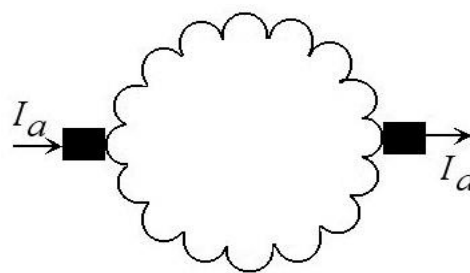


Рисунок 1.22 - Послідовно секції ОЯ

З'єднані послідовно секції ОЯ утворюють замкнуте коло (рис. 1.22). Його можна зобразити у вигляді замкнутої спіралі, по якій ковзають щітки (рис. 1.22). У даному випадку кількість пар паралельних гілок $a = 1$. У загальному випадку $a = 1, 2, 3 \dots$ Для забезпечення найкращих умов роботи МПС необхідно, щоб ЕРС (E_a) усіх паралельних гілок та їхній опір були однакові.

У цьому випадку струми паралельних гілок будуть однакові. Для задоволення цих умов необхідно таке: щоб магнітне коло МПС було симетричним, потоки всіх полюсів повинні бути однаковими; всі пари паралельних гілок повинні бути еквівалентними.

Обмотку, що задовольняє ці умови, називають симетричною. Для того щоб обмотка була симетричною, необхідно

$$Z_e/a = U_n Z/a = S/a = K/a = \text{ціле число (ц. ч.)}.$$

Для симетричного розташування паралельних гілок у магнітному полі необхідно виконати умови $Z_e/a = \text{ц.ч.}$ та $2p/a = \text{ц.ч.}$

При виборі ширини секції ОЯ необхідно таке: одержати найбільшу ЕРС; забезпечити задовільні умови зняття струму; забезпечити мінімальні витрати міді.

Припустимо, що магнітне поле у зазорі $B(x)$ розподіляється за синусоїдальним законом (рис. 1.23). ЕРС секції буде найбільшою, якщо прямий провідник секції займає положення 1, а зворотний – 2. У цьому випадку ширина секції дорівнює полюсному діленню – $y_1 = \tau$. Якщо змінити ширину секції (рис. 1.23), то для секції 1-3 $y_1 < \tau$ має місце деяке зменшення ЕРС та мінімальна витрата міді. Для секції 1-4 $y_1 > \tau$ ЕРС зменшується, але витрата міді збільшується за рахунок збільшення довжини лобових (неактивних) частин ОЯ.

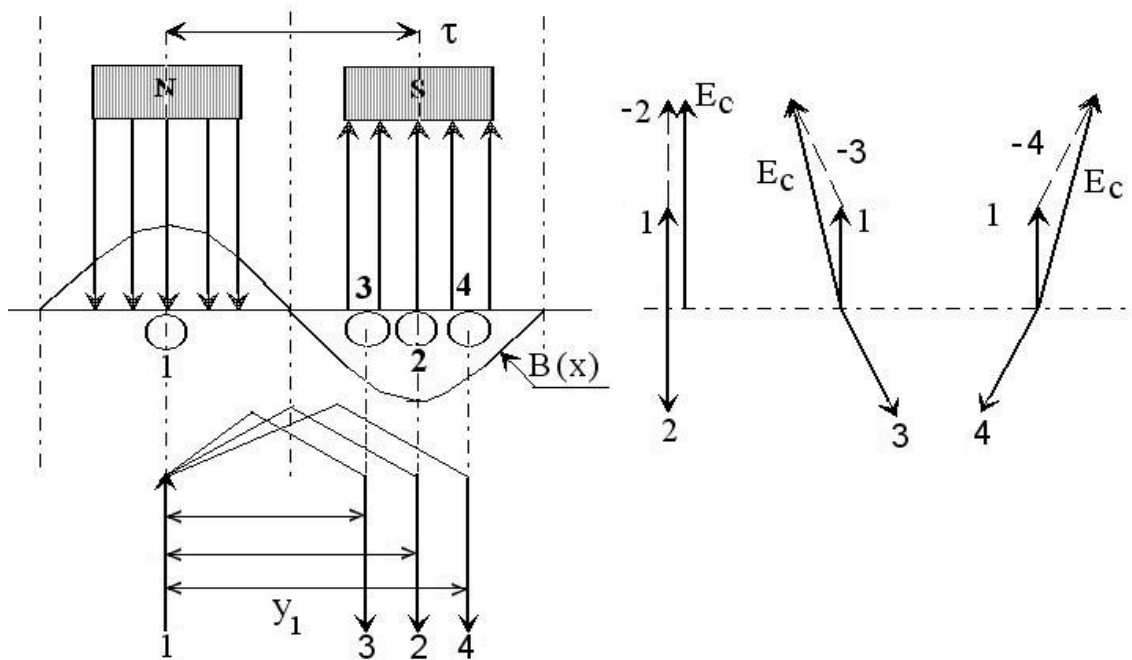


Рисунок 1.23 - Магнітне поле у зазорі

Ширину секції (або перший частковий крок ОЯ) розраховують у пазових (зубцевих) діленнях

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \xi$$

де ξ – дробова частина, при якій крок y_1 дорівнює цілому числу (ц. ч.).

У секціях ОЯ індукуються змінна ЕРС, із якої можна виділити першу гармоніку. Уявимо, що вздовж розточки розподілені 4 полюси. Кожній парі полюсів відповідає одна повна синусоїда ЕРС або 2π електричних градусів (рис. 1.24). Вздовж розточки якоря буде $2 \cdot 2\pi$ електричних градусів. Якщо МПС має p полюсів, то вздовж окружності якоря буде розміщено p синусоїд. Отже, вздовж окружності якоря ($2p$ геометричних градусів) буде розподілено $p \cdot 2\pi$ електричних градусів.

Таким чином,

$$1 \text{ ел. град.} = p \cdot 1 \text{ геом. град.}$$

Синусоїдальний розподіл магнітного поля у просторі вздовж розточки якоря зумовлює синусоїдальну ЕРС секції ОЯ. Синусоїдальна функція може бути зображена вектором, який дорівнює за величиною амплітуді ЕРС, що обертається із кутовою частотою $\omega = 2\pi f = 2\pi n/60$. Проекція вектора на вісь ординат дасть миттєве значення ЕРС секції. Пази якоря порізноmu розміщені відносно основної гармоніки поля полюсів (рис. 1.23), ому ЕРС провідників різних пазів будуть зсунуті в часі за фазою. Кут зсуву між ЕРС провідників сусідніх елементарних пазів, *ел. град.*

$$\alpha = \frac{360p}{Z_e}.$$

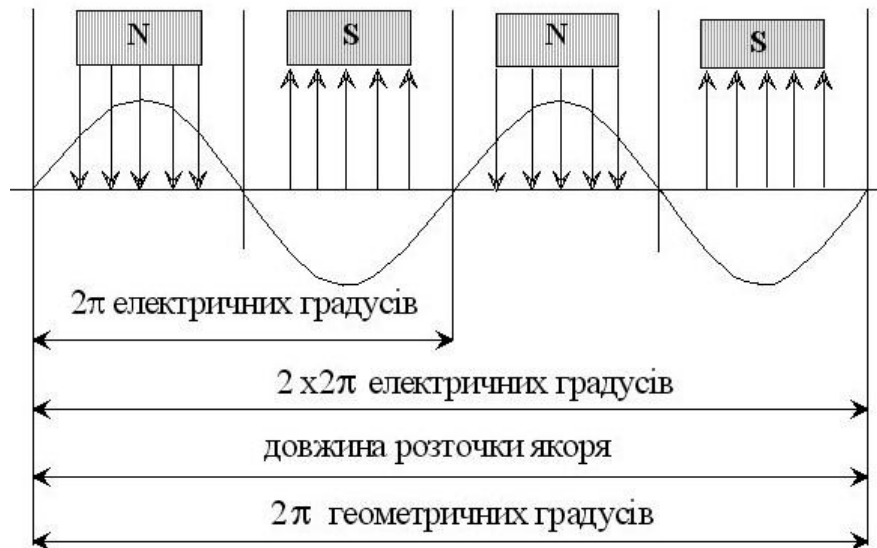


Рисунок 1.24 - Синусоїдальна ЕРС

Обмотки якоря МПС можна поділити на 3 групи:

- петльові (ПО);
- хвильові (ХО);
- комбіновані (КО).

Ерс та електромагнітний момент

Електрорушійна сила обмотки якоря

У провідниках ОЯ, покладеної у пази якоря, наводиться ЕРС, напрямок якої визначається за правилом правої руки.

Миттєве значення ЕРС, індукованої у кожному активному провіднику ($l_{\text{пр}} = l_{\delta}$),

$$e_{\text{пр}} = B_x l_{\delta} v_a.$$

де B_x – індукція у точці x , в якій розміщений провідник активною довжиною l_{δ} , що переміщується відносно магнітного поля зі швидкістю v_a .

Індукція магнітного поля розподіляється у повітряному зазорі вздовж розточки якоря за законом, близьким до трапецієвидного. Якщо виділити на полюсній поділці середнє значення індукції B_{cp} , то середнє значення ЕРС у провіднику

$$E_{cp} = B_{cp} l_{\delta} v_a.$$

Позначимо через N повну кількість провідників ОЯ, $2a$ – кількість паралельних гілок обмотки. На одну паралельну гілку припадає $N/2a$ провідників. Тоді ЕРС ОЯ (та ЕРС паралельної гілки ОЯ)

$$E_a = B_{cp} \frac{N}{2a} l_{\delta} v_a$$

Лінійна швидкість

$$v_a = \frac{\pi D_a n}{60}.$$

Полюсна поділка машини

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}.$$

ЕРС обмотки якоря

$$E_a = \frac{N}{2a} \cdot \frac{\pi D_a}{2p} \cdot \tau B_{cp} l_\delta.$$

Магнітний потік

$$\Phi = \tau B_{cp} l_\delta.$$

ЕРС обмотки якоря приймає вигляд

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

Як що ввести позначення

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

ЕРС ОЯ з діаметральним кроком $y_1 = \tau$ на щітках, розташованих на лініях геометричної нейтралі

$$E_a = c_e \cdot n \Phi.$$

Якщо виразити частоту обертання машини (n) через кутову швидкість (Ω), тобто $n = 30\Omega / \pi$, та підставити то ЕРС ОЯ

$$E_a = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Omega \Phi = c \cdot \Omega \Phi.$$

де c - конструктивний коефіцієнт

$$c = \frac{pN}{2\pi a}.$$

Електромагнітний момент машини постійного струму

При протіканні струму по провіднику обмотки якоря на нього діє сила

$$f_x = B_x i_{пр} l_\delta.$$

Результуюча електромагнітна сила, що діє на всі N провідників ОЯ,

$$F_{ем} = N f_{cp}.$$

З урахуванням середнього значення індукції у повітряному зазорі

$$F_{ем} = N B_x i_{пр} l_\delta.$$

струму паралельної гілки ОЯ $i_{пр} = I_a / 2a$ електромагнітний момент дорівнює

$$M_{ем} = F_{ем} \frac{D_a}{2} = N B_x l_\delta \frac{I_a D_a}{2a} = c \Phi I_a.$$

Магнітне поле

У МПС є дві системи провідників зі струмом:

- обмотка збудження, що розташована на головних полюсах з постійним струмом;
- обмотка якоря зі змінним струмом.

Таким чином, можна виділити дві складові магнітного поля МПС, що створюють єдине результуюче магнітне поле:

основне поле; – поле якоря.

Розкладання результуючого поля застосовується для простоти аналізу. При цьому застосовується метод накладання (суперпозиції), який припускає окремий розгляд основного поля та поля якоря, а результуючу картину одержують їхнім суміщенням.

Цей метод дає вірні результати, якщо насичення магнітного кола машини залишається постійним, тобто $\mu = const$.

Магнітне поле при неробочому ході

Основне поле виникає при неробочому ході збудженої машини. Картина поля (рис. 1.25) має симетричний характер відносно осі полюсів ($d-d$).

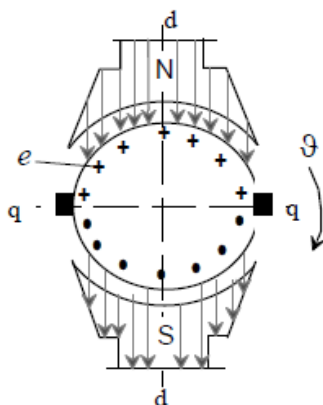


Рисунок 1.25 - Картина поля при неробочому ході збудженої машини

Якщо зобразити розподіл індукції $B_\delta(x)$ у повітряному зазорі (рис. 1.26), то він має вид трапеції. При цьому впродовж полюсної дуги (b_p) індукція буде незмінною, так як при $\delta = const$ $\Phi = F/R_\mu = const$, у точках, що лежать на лініях геометричної нейтралі, індукція дорівнює нулю.

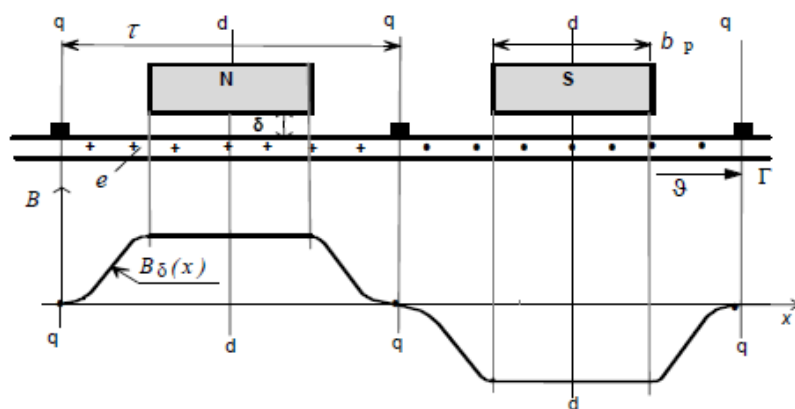


Рисунок 1.26. - Розподіл основного магнітного поля

Геометричною нейтраллю (q-q) називають лінію, що проходить по середині між основними полюсами машини.

Під **фізичною нейтраллю** ($n-n$) вважають лінію, що проходить через точки на поверхні якоря, у яких індукція магнітного поля дорівнює нулю.

У режимі неробочого ходу лінії геометричної та фізичної нейтралей збігаються.

Магнітне поле якоря

Поле якоря утворюється, коли машина не збуджена, а до обмотки якоря підводиться струм через щітки, встановлені на лінії геометричної нейтралі. Магнітне поле, створене системою провідників ОЯ (що визначається за правилом буравчика), симетрично відносно лінії $q-q$ (рис. 1.27).

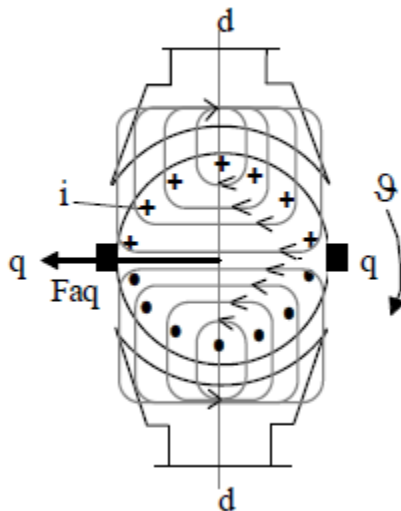


Рисунок 1.27 - Поле якоря утворюється, коли машина не збуджена

Найменше значення індукції B_{aq} буде у точці, що лежить на лінії геометричної нейтралі ($q-q$). Зміна індукції поля якоря $B_{aq}(x)$ носить нелінійний характер, що обумовлено складним зако $\lambda_\delta(x)$.

При щітках, розташованих на лінії геометричної нейтралі, поле якоря замикається по поперечній осі та носить назву поперечної реакції якоря.

Магнітне поле при навантаженні

Під впливом поля якоря розподіл основного поля (рис. 1.28) змінюється. Вплив поля якоря на основне магнітне поле називають реакцією якоря.

Представимо якір у розгорнутому вигляді (рис. 1.30) та зобразимо залежності $B_\delta(x)$ та $B_{aq}(x)$, відповідні полю збудження і полю якоря машини. Результуючу характеристику $B_\Sigma(x)$ дістаємо шляхом складання ординат кривих $B_\delta(x)$ та $B_{aq}(x)$.

Під одним з країв полюсної дуги магнітні поля збудження і якоря складаються, ця частина полюса насичується.

Арифметичне складання ординат кривих $B_\delta(x)$ та $B_{aq}(x)$ можливо лише при ненасиченій магнітній системі. Тому дійсна крива $B_\Sigma(x)$ (рис. 1.28, крива 2) буде проходити нижче від кривої 1, одержаної для ненасиченої машини. У результаті дії магнітного поля якоря на основне магнітне поле машини крива розподілу основного поля деформується.

У випадку насиченої машини (що практично завжди має місце) збільшення індукції під збігаючим краєм полюса (при роботі МПС у режимі генератора) менш, ніж зменшення поля під набігаючим краєм полюсу, що призводить до зменшення магнітного потоку полюсу при переході від неробочого ходу до роботи під навантаженням.

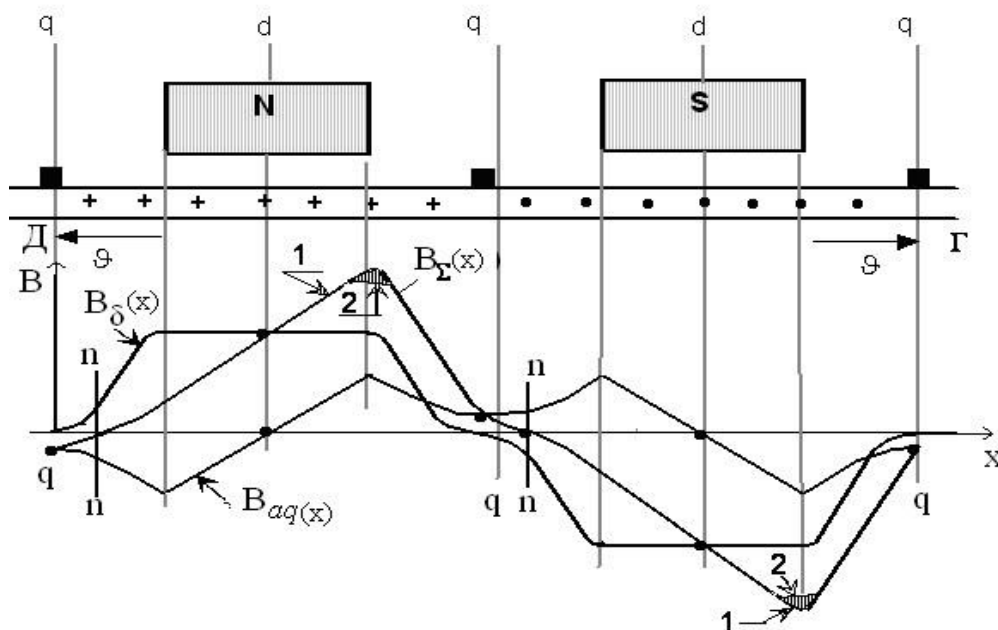


Рисунок 1.28. - Розподіл магнітного поля при навантаженні

Найбільше значення індукції у повітряному зазорі при переході до режиму навантаження зростає, що призводить до збільшення напруги між сусідніми колекторними пластинами та може призвести до пробоя ізоляції між пластинами.

Лінія фізичної ($n-n$) нейтралі зміщується відносно лінії геометричної ($q-q$) нейтралі за напрямом обертання МПС у генераторному режимі та у секції ОЯ, що комутується, буде наводитися ЕРС від поперечного поля якоря, що погіршує комутацію машини. На частині полюсної дуги магнітне поле може змінювати знак, тобто може відбуватися перекидання магнітного поля.

Поле якоря при зсуві щіток

При зсуві щіток з лінії геометричної нейтралі ($q-q$) на кут 90° , тобто при розташуванні їх по осі полюсів, створене якорем магнітне поле буде поздовжнім (направлене вздовж полюсів). При цьому залежно від напрямку струму в якорі воно буде діяти або згідно, або зустрічно із основним полем.

Якщо щітки зсунуті з лінії геометричної нейтралі (рис. 1.29, а) на деякий кут $0 < \beta < 90^\circ$ цьому випадку поверхню якоря можна розбити на дві пари симетричних секторів (рис. 1.29, б, в).

Струми першої пари секторів (рис. 1.29, б) створюють поперечне поле якоря, а струми другої пари (рис. 1.29, в) – поздовжнє поле якоря.

З рис. 1.29 видно, що при зсуві щіток за напрямком обертання двигуна або проти напрямку обертання генератора виникає поздовжня намагнічуюча МРС якоря. При зсуві щіток у протилежний напрямок буде діяти розмагнічуюча МРС якоря.

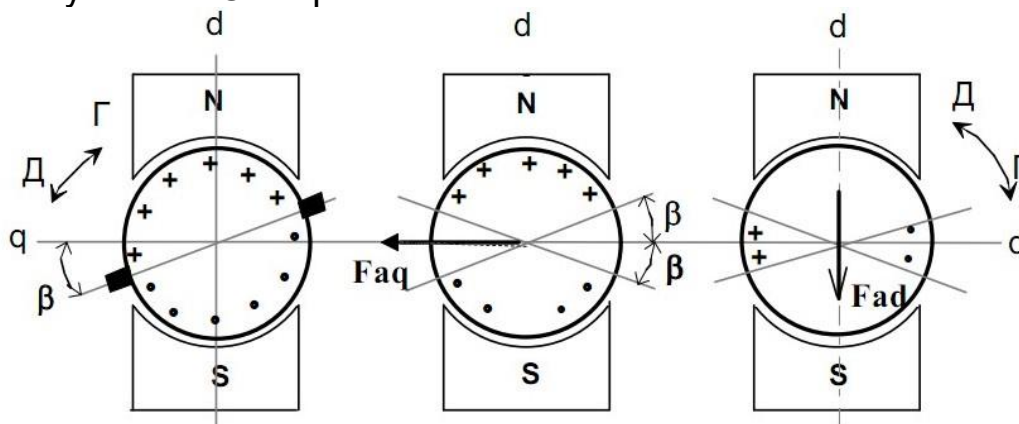


Рисунок 1.29 - МРС якоря при зсуві щіток

Для компенсації дії МРС необхідно збільшити МРС збудження, якщо поздовжня реакція якоря розмагнічуюча, або зменшити МРС збудження, якщо МРС намагнічуюча.

Поліпшення форми кривої розподілу магнітного поля

Для поліпшення форми кривої розподілу індукції у повітряному зазорі застосовується компенсаційна обмотка, що розташовується у пазах полюсних наконечників головних полюсів та вмикається послідовно з якорем.

У межах полюсної дуги МРС якоря компенсується, а у просторі між полюсами залишається невелика некомпенсована МРС, але внаслідок того, що довжина силової лінії поля у цій зоні велика, утворюється відносно слабке магнітне поле.

З метою зменшення впливу поля якоря повітряний зазор у МПС виконують нерівномірним, а саме: ексцентричним, клиноподібним або частково розширеним. У цих випадках повітряний зазор буде найбільшим на краю полюсної дуги.

Так як найбільший вплив поля якоря на поле збудження має місце при рівномірному повітряному зазорі, то в таких машинах повинна застосовуватися компенсаційна обмотка.

Розглянемо зміну струму в секції петльової обмотки якоря при його обертанні (рис. 1.32). При переміщенні секції 1 вздовж полюсної дуги струм у ній зберігає значення $i_a = I_a/2a$ (рис. 1.32,а,в,г).

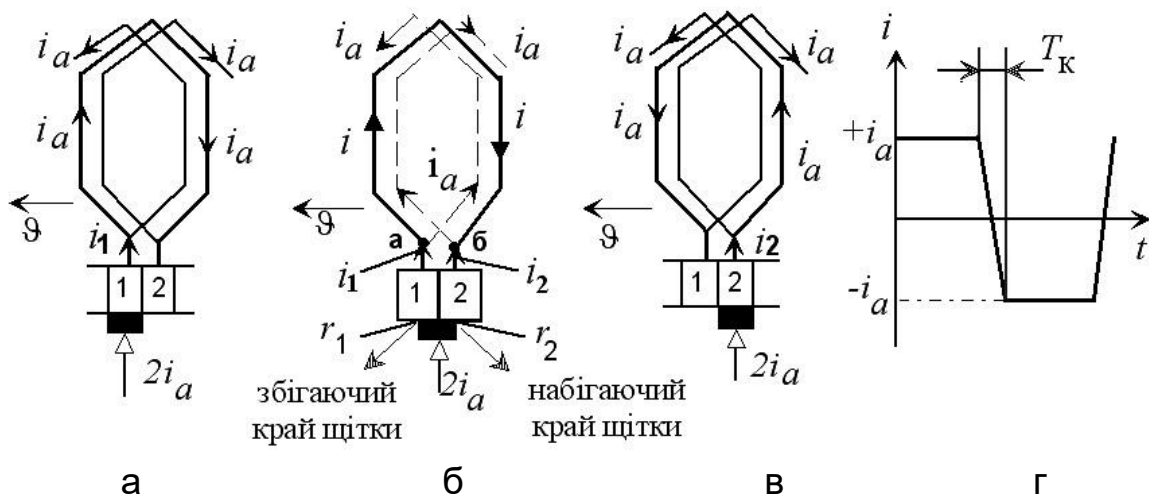


Рисунок 1.30 - Зміна струму в секції простої ПО

При переході секції в іншу паралельну гілку струм у ній змінює свій напрям (рис. 1.30,в). Під комутацією розуміють процес переходу секції з однієї паралельної гілки в іншу. Процеси, що відбуваються при цьому в секції ОЯ, називають комутаційними.

Початком комутаційного процесу в першій секції ОЯ вважається момент часу, коли край щітки, що набігає, торкнеться другої колекторної пластини (рис. 1.30,а), закінчення комутації – розрив контакту між краєм щітки, що збігає, та першою колекторною пластиною (рис. 1.30,в).

З точки зору експлуатації важливо, щоб комутація відбувалася без значного іскріння під щіткою, так як це псує поверхні колектора та щіток і може призвести до кругового вогню по колектору та замиканню секцій ОЯ шляхом електричної дуги. Час, протягом якого секція переходить з однієї паралельної гілки в іншу (рис. 1.32,б,г), називають періодом комутації (T_K), тобто це час переміщення колектора з числом колекторних пластин K , що обертається зі швидкістю ϑ_K , на ширину щітки $b_{щ}$.

Коефіцієнт щіткового перекриття $\beta_K = b_{щ}/t_K$.

Для надійної комутації приймається $\beta_K = (2 \div 4)$.

Класи комутації

Іскріння на колекторі МПС оцінюється за мірою іскріння під краєм щітки, що збігає, та за класом комутації.

Таблиця 1.1 - Класи комутації МПС

Клас комутації	Характеристика міри іскріння	Стан колектора і щіток
1	Відсутність іскріння (темна комутація)	Відсутність почорніння на колекторі та нагару на щітках
$1\frac{1}{4}$	Слабке крапкове іскріння під невеликою частиною щітки	
$1\frac{1}{2}$	Слабке іскріння під більшою частиною щітки	Поява слідів почорніння на колекторі, а також слідів нагару на щітках, які легко усуваються протиранням поверхні колектора бензином
2	Іскріння під всім краєм щітки. Допускається тільки за короточасних поштовхів навантаження та перевантаження	Поява слідів почорніння на колекторі, а також слідів нагару на щітках, які не усуваються протиранням поверхні бензином
3	Значне іскріння під всім краєм щітки з наявністю великих іскор. Допускається тільки для моментів прямого вмикання або реверсування машин, якщо при цьому колектор та щітки залишаються в стані, придатному для подальших робіт	Значне почорніння на колекторі, яке не усувається протиранням поверхні колектора бензином, а також підгоряння та руйнування щіток

Способи поліпшення комутації

Всі способи пов'язані із зменшенням додаткового струму комутації і зводяться до такого: – створення комутаційної ЕРС за допомогою додаткових полюсів або зрушення щіток з лінії геометричної нейтралі; – зменшення реактивної ЕРС; – збільшення опору кола комутаційної секції.

Додатковий полюс (ДП). ДП розташовується на лінії геометричної нейтралі.

МРС додаткового полюса повинна компенсувати МРС якоря у зоні комутації і, крім того, створити комутаційне поле із індукцією B_k для компенсації реактивної ЕРС та отримання прискореної комутації.

Якщо МПС працює у режимі генератора, то полярність ДП повинна бути аналогічною полярності наступного за ним за напрямком обертання головного полюса та протилежною для рухового режиму.

Для зменшення розсіювання ДП його обмотку розташовують ближче до якоря, а у великих МПС утворюють додатковий зазор між полюсом та станиною за допомогою немагнітних прокладок.

Число додаткових полюсів звичайно обирається таким, що дорівнює числу головних полюсів, тобто $2p_d = 2p$. Інколи в машині встановлюють половинне число ДП. У малих МПС з $2p = 2$ встановлюють один ДП.

Зсув щіток. У МПС потужністю до декількох сот Ват ДП не встановлюють. Комутаційне поле у таких машинах створюється шляхом зсуву щіток з лінії геометричної нейтралі. При цьому у зоні комутації буде діяти поле основних полюсів. Щоб індукована цим полем ЕРС у комутаційній секції була направлена проти реактивної ЕРС, поле комутації повинно бути направлено проти поля якоря.

Для досягнення ефекту компенсації реактивної ЕРС щітки необхідно зсувати за напрямком обертання у режимі генератора та проти напрямку обертання у режимі двигуна.

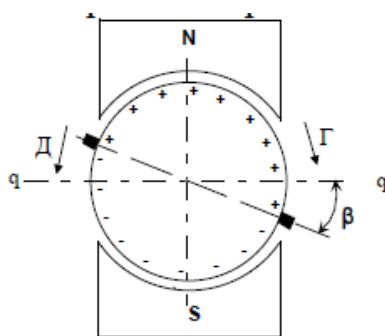


Рисунок 1.31 - Зсув щіток відносно геометричної нейтралі.

Оскільки величина індукції B_{aq} змінюється із зміною струму якоря, то змінюється і положення лінії фізичної нейтралі.

Тому зсув щіток здійснюється так, щоб повна компенсація мала місце при середньому навантаженні.

Для реверсивних машин зсув щіток неприпустим, тому що компенсація поля якоря забезпечується тільки при одному напрямку обертання МПС.

Зменшення реактивної ЕРС.

Зменшення e_r може бути здійснене на стадії проектування ОЯ шляхом вибору мінімально можливого значення числа витків у секції (w_c) ОЯ. Зменшення коефіцієнта питомої магнітної провідності (ξ)

комутаційних секцій можливо за рахунок використання східчастих обмоток, у яких U_n верхніх сторін секцій розміщені в одному пазу, а U_n нижніх сторін секцій – в різних пазах.

У петльових обмотках обирається K/p – непарне число, при цьому секції сусідніх полюсів комутуються зі зсувом. Для зменшення ξ бажано збільшення щіткового перекриття $\beta_k = b_{щ}/t_k$. Зниження ξ досягається застосуванням більш високих провідників у пазу. При цьому у момент комутації виявляється ефект витиснення струму, що зменшує індуктивність секції. Проте висота провідника обмежується за умовою зменшення додаткових втрат від поперечного пазового потоку розсіювання.

Збільшення опору комутаційної секції. Це можливо зробити за рахунок збільшення опору петушків колекторних пластин. Однак це знижує ККД та надійність машини. Один з заходів – правильний підбір марки щіток.

Переваги і недоліки двигунів постійного струму

ДПС використовуються в таких галузях як: металургія і металообробка, транспорт (електровози, тепловози, електропоїзди, трамваї, електромобілі), водний транспорт, поліграфічна промисловість, вантажопідйомна техніка тощо. ДПС невеликої потужності застосовують у багатьох системах автоматики. Зазначимо переваги і недоліки колекторних ДПС порівняно з двигунами змінного струму:

Переваги:

- здатність забезпечувати плавне регулювання частоти обертання, а також реверс без використання складних і дорогих перетворювачів;
- кращі пускові властивості;
- більша перевантажувальна спроможність;
- можливість одержання частоти обертання більше 3000 об/хв (максимальна частота для машин змінного струму при $f = 50\text{Гц}$).

Недоліки:

- складність конструкції;
- відносно висока вартість;
- знижена надійність внаслідок наявності щітково-колекторного вузла.

Висновки.

1. Електричні машини постійного струму (МПС) є базовим класом електричних машин, принцип дії яких ґрунтується на законах електромагнітної індукції, електромагнітних сил та повного струму.
2. Історичні відкриття Ерстеда, Фарадея, Ленца та Якобі заклали основу розвитку електромеханіки і створення перших електричних двигунів та генераторів.
3. Основними елементами МПС є: станина, головні та додаткові полюси, обмотка збудження, якір з обмоткою, колектор, щітковий апарат і підшипникові щити.
4. Колектор у генераторі виконує функцію механічного випрямляча, а у двигуні — інвертора, що забезпечує безперервність обертального руху.
5. Електрорушійна сила та електромагнітний момент у МПС визначаються конструктивними параметрами, магнітним потоком та струмом якоря.

6. Робота МПС можлива як у режимі генератора, так і двигуна завдяки принципу оборотності електричних машин.
7. Реакція якоря впливає на розподіл магнітного поля машини, що може викликати погіршення комутації та зменшення ефективності роботи.
8. Для покращення комутації застосовують компенсаційні обмотки, додаткові полюси, зсув щіток та інші методи.
9. Удосконалення МПС історично відбувалося у напрямку підвищення надійності та зменшення матеріаломісткості, проте на сучасному етапі їх застосування обмежене через поширення асинхронних та синхронних машин.
10. МПС залишаються важливими у спеціалізованих сферах (електротранспорт, зварювальні установки, системи керування), де потрібні регульовані характеристики та високий пусковий момент.

Контрольні питання.

1. Які основні закони електромеханіки лежать в основі роботи електричних машин?
2. Хто є авторами ключових відкриттів, що сприяли створенню перших електричних машин?
3. Яка будова та призначення основних елементів машини постійного струму?
4. Яку функцію виконує колектор у генераторі та двигуні постійного струму?
5. Як визначається електрорушійна сила (ЕРС) обмотки якоря?
6. Як формується електромагнітний момент у машині постійного струму?
7. У чому полягає принцип оборотності електричних машин?
8. Що таке реакція якоря і як вона впливає на магнітне поле машини?
9. Які існують методи поліпшення комутації у МПС?
10. Чим відрізняється поперечна та поздовжня реакція якоря?
11. Які види обмоток якоря застосовуються у МПС?
12. Як визначається симетричність обмотки якоря?
13. У чому полягає різниця між генераторним та двигунним режимом роботи МПС?
14. Які матеріали застосовують для виготовлення станини, полюсів та обмоток МПС?
15. Які сфери застосування машин постійного струму у сучасній техніці?

Використана література.

1. Колотіло В. І., Донець О. В. Теорія електропривода : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка). Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 148 с.

2. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.

3. Гайденко Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.

4. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.

5. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331с.

ТЕМА 2. ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Робота машини постійного струму в режимі генератора. Характеристики генератора незалежного збудження. Генератор паралельного збудження. Умови самозбудження. Генератор змішаного та послідовного збудження. Висновки.

Класифікація генераторів постійного струму по способу збудження

Генератори постійного струму можуть мати різні способи збудження. У найбільш загальному випадку їх поділяють:

- генератори зі збудженням від постійних магнітів;
- генератори з електромагнітним збудженням.

Оскільки генератори зі збудженням від постійних магнітів мають обмежену сферу застосування, подальший розгляд доцільно зосередити на генераторах з електромагнітним збудженням.

Таким чином, основний спосіб збудження генераторів постійного струму – це збудження електромагнітним шляхом.

Ці генератори поділяють на:

- – генератори незалежного збудження;
- – генератори із самозбудженням.

Генератори незалежного збудження (рис. 2.1)

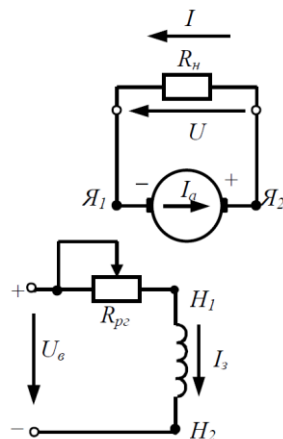


Рисунок 2.1 - Принципова схема генератора незалежного збудження.

На рис. 2.1 позначено: $Я_1 - Я_2$ – коло обмотки якоря; $H_1 - H_2$ – коло обмотки збудження; U – напруга в колі якоря; I – струм навантаження; I_a – струм якоря; U_3 – напруга на обмотці збудження; I_3 – струм збудження.

У генераторах незалежного збудження обмотка збудження живиться від окремого джерела постійного струму. Струм збудження I_3 визначається напругою на затискачах кола збудження U_3 та опором цього кола. Втрати потужності на збудження зазвичай не перевищують 2–3 % від потужності генератора. Незалежне збудження широко застосовують у машинах низької напруги (4–12 В), високої напруги (понад 500 В), у машинах

великої потужності, а також у випадках, коли необхідний широкий діапазон регулювання напруги.

Відповідно до схеми, у загальному випадку

$$U = U_3 \text{ і } I_a = I.$$

Генератори постійного струму із самозбудженням поділяють на машини з паралельним, послідовним і змішаним збудженням.

Генератори паралельного збудження (шунтові) (рис. 22.2)

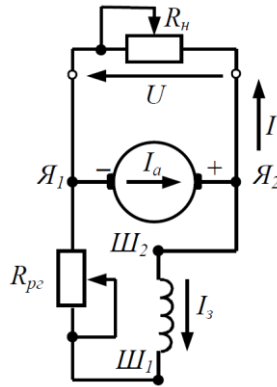


Рисунок 2.2 - Принципова схема генератора паралельного збудження.

На рис. 2.2 позначено: Ш₁ – Ш₂ – коло обмотки збудження.

Відповідно до схеми

$$U_3 = U, \quad I_a = I + I_3.$$

У генераторах паралельного збудження обмотку збудження підключають до затисків обмотки якоря. Із наведеної схеми видно, що струм збудження I_3 залежить від напруги на затискачах якоря, а струм якоря I_a дорівнює сумі струму навантаження I та струму збудження I_3 .

Генератори паралельного збудження є дуже розповсюдженим типом генератора постійного струму, тому що не вимагають окремого джерела струму для збудження і дають в межах нормального навантаження досить стійку напругу.

Генератори послідовного збудження (серієсні) (рис. 2.3)

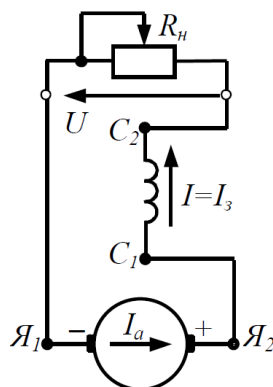


Рисунок 2.3 - Принципова схема генератора послідовного збудження

На рис. 2.3 позначено: $C_1 - C_2$ – коло обмотки збудження.
Відповідно до схеми

$$I_a = I_3 = I.$$

Із схеми видно, що струм збудження I_3 дорівнює струму якоря I_a , тобто повністю залежить від навантаження генератора. Це погіршує робочі властивості машини, оскільки напруга генератора змінюється залежно від струму навантаження I , тоді як у більшості випадків вона має залишатися відносно сталою. Тому в генераторах такий спосіб збудження нині застосовують обмежено.

Генератори змішаного збудження (компаундні) (рис. 2.4).

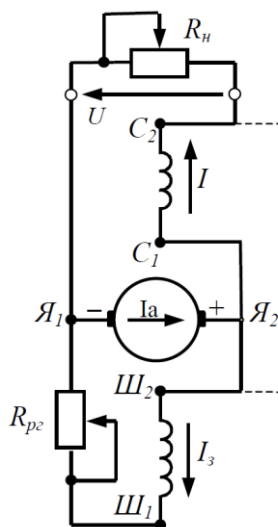


Рисунок 2.4 - Принципова схема генератора змішаного збудження.

Генератори змішаного збудження мають дві обмотки збудження паралельну ($\text{Ш}_1 - \text{Ш}_2$) і послідовну ($C_1 - C_2$).

Як правило, головне значення має паралельна обмотка, а послідовна відіграє роль додаткової обмотки.

Наявність двох обмоток збудження дозволяє автоматично підтримувати необхідну напругу на затискачах приймача.

По способу приєднання паралельної обмотки до якоря розрізняють:

- а) короткий шунт;
- б) довгий шунт.

Перший показаний на рис. 22.4 суцільною лінією, другий – переривчастою. Практично різниця між обома способами несуттєва.

Основні рівняння генераторів постійного струму

Незалежно від способу збудження для генераторів постійного струму справедливі наступні основні рівняння:

Рівняння напруг для кола якоря:

$$U = E_a - I_a R_a,$$

де U – вихідна напруга генератора; $E_a = c_e n \Phi$ – ЕРС обмотки якоря, $c_e = pN/60a$ – постійна машини; p – число пар полюсів; N – число провідників обмотки якоря; a – число паралельних віток обмотки якоря; $I_a R_a$ – спад напруги в колі обмотки якоря й в обмотках, включених послідовно з обмоткою якоря (обмотка додаткових полюсів, компенсаційна обмотка); I_a – струм якоря; R_a – активний опір кола обмотки якоря.

Із наведеного рівняння випливає, що вихідна напруга генератора залежить від навантаження та частоти обертання машини n . Регулювання цієї напруги насамперед здійснюють зміною магнітного потоку Φ на кожному полюсному поділку, що на практиці зводиться до регулювання струму збудження.

Електромагнітний момент генератора визначається за виразом:

$$M_{\text{ем}} = C_M I_a \Phi$$

де $C_M = \frac{pN}{2\pi a}$ – постійна машини.

Електромагнітний момент генератора є гальмовим і в сталому режимі врівноважується обертальним моментом приводного двигуна:

$$M_1 = M_{\text{ем}} + M_0$$

де M_1 – обертальний момент приводного двигуна; $M_{\text{ем}}$ – електромагнітний момент генератора; M_0 – момент холостого ходу генератора, що відповідає механічним втратам генератора і втратам в сталі його якоря.

Робочі характеристики генераторів постійного струму

До робочих характеристик, що описують поведінку генераторів в сталому режимі роботи під навантаженням, відносяться:

- Навантажувальна характеристика

$$U = f(I_3) \text{ при } I = \text{const}, n = \text{const}.$$

В окремому випадку при $I = 0$, залежність $U_0 = f(I_3)$ – є характеристикою холостого ходу генератора.

- Зовнішня характеристика

$$U = f(I) \text{ при } R_3 = \text{const}(I_3 = \text{const}), n = \text{const}.$$

- Регульовальна характеристика

$$I_3 = f(I) \text{ при } U = \text{const}, n = \text{const}.$$

В окремому випадку при $U = 0$ залежність $I_K = f(I_3)$ – є характеристикою короткого замикання генератора.

Розглянемо робочі характеристики генераторів постійного струму, як отримані експериментально.

Характеристика холостого ходу

Ця характеристика являє собою залежність напруги на виході генератора в режимі холостого ходу U_0 від струму збудження I_3 при струмі навантаження $I = 0$ і частоті обертання $n = \text{const}$.

Приблизний вид характеристики холостого ходу генератора з незалежним збудженням представлений на рис. 2.5. Експеримент зняття

характеристики варто починати зі значення $I_3 = 0$, при якому напруга $U_0 = U_N$ перевищує номінальне на 10 – 20 %. Після цього зменшують струм збудження до нуля ($I_3 = 0$), а потім змінюють його напрям на зворотний ($-I_3$). Це дає нам *спадну вітку 1-1* характеристики холостого ходу. Щоб одержати її *висхідну вітку 2-2*, досить повернути вітку 1-1 на 180° навколо точки O .

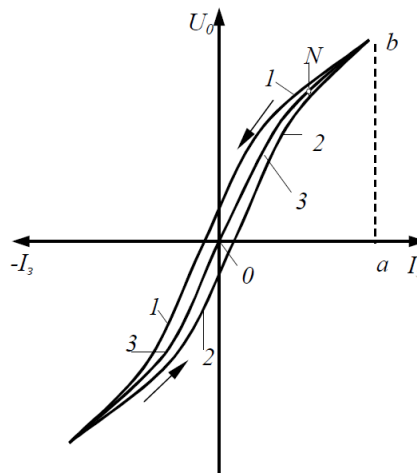


Рисунок 2.5 - Характеристика холостого ходу генератора незалежного збудження

При практичному використанні характеристики холостого ходу користуються не тією чи іншою її віткою, а кривою 3-3, проведеної саме між кривими 1-1 і 2-2.

По характеристиці холостого ходу ми можемо судити про властивості магнітного кола машини. Справді, точка характеристики при $I_3 = 0$ свідчить про величину потоку залишкового намагнічування $\Phi_{\text{зал.}}$. Як правило $\Phi_{\text{зал.}} = 1 \div 3\%$ від потоку машини Φ , що відповідає номінальному режиму роботи генератора.

Далі, вітки 1-1 і 2-2 утворюють гістерезисну петлю, що дає нам уяву про властивості сталі полюсів і ярма.

Нарешті, по положенню на характеристиці точки N , що відповідає номінальній ЕРС, ми можемо судити про ступінь насичення магнітного кола. Як правило ця точка лежить на перегині кривої, тому що робота на прямолінійній частині кривої викликала б хитливу напругу, а робота за перегином, тобто в насиченій частині кривої, обмежувала б можливість регулювання напруги.

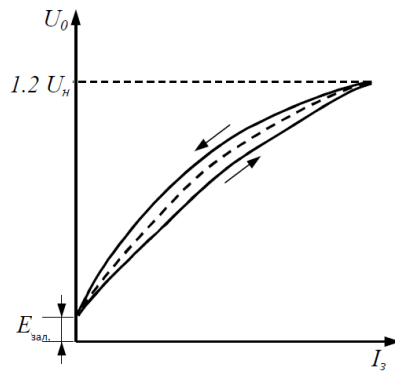


Рисунок 2.6. - Характеристика холостого ходу генератора паралельного збудження

Характеристику холостого ходу генератора паралельного збудження (рис. 2.6) знімають аналогічно до генератора незалежного збудження. Однак, оскільки самозбудження можливе лише в одному напрямку, характеристику можна отримати тільки для одного напрямку струму збудження. На рис. 2.6 $E_{зап.}$ позначає ЕРС обмотки якоря, зумовлену потоком залишкового намагнічування.

Для генератора послідовного збудження характеристику холостого ходу можна зняти лише за незалежного живлення обмотки збудження; за формою вона подібна до характеристики генератора незалежного збудження. У генераторів змішаного збудження характеристика холостого ходу має такий самий вигляд, як у генераторів паралельного збудження, оскільки при розімкненому колі якоря послідовна обмотка збудження не бере участі у створенні магнітного потоку.

Характеристика короткого замикання

Ця характеристика являє собою залежність струму якоря при короткому замиканні I_K від струму збудження I_3 при напрузі на виході генератора $U = 0$ і частоті обертання $n = const$ (рис. 2.7).

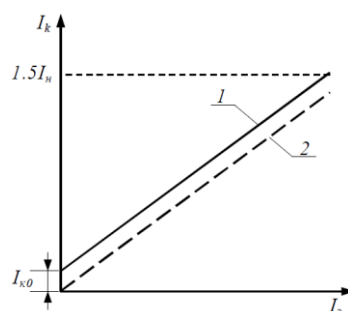


Рисунок 2.7 - Характеристика короткого замикання генератора незалежного збудження (1), розрахункова характеристика короткого замикання (2).

Характеристику короткого замикання знімають при замкнутих накоротко затискачах кола якоря. Струм збудження I_3 поступово збільшують

до такого значення, щоб струм якоря при короткому замиканні I_k не перевищував $1,5I_n$. Оскільки магнітне коло в цьому режимі не насичене, характеристика має майже лінійний характер.

При всіх способах збудження характеристика короткого замикання може бути знята тільки *при незалежному живленні* обмотки збудження.

Навантажувальна характеристика

Ця характеристика виражає залежність напруги U на виводах генератора від струму збудження I_3 при незмінному струмі навантаження $I = const$ і незмінній частоті обертання $n = const$.

При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС.

Тому навантажувальна характеристика (крива 1) розташовується нижче характеристики холостого ходу (крива 2) на рис. 2.8.

Якщо від точки a , що відповідає номінальній напрузі U_n , відкласти нагору відрізок ab , рівний $I_a r_a$, і провести горизонтально відрізок bc до перетину з характеристикою холостого ходу, а потім з'єднати точки a і c , то одержимо трикутник abc , називаний реактивним трикутником.

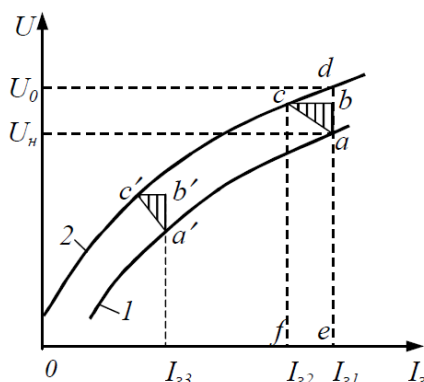


Рисунок 2.8 - Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження.

Так, при роботі генератора в режимі холостого ходу при струмі збудження I_{31} напруга на виводах дорівнює $U_0 = de$; з підключенням навантаження (при незмінному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення $U_n = ae$.

Таким чином, відрізок da виражає величину напруги $\Delta U = U_0 - U_n$ при $I_3 = I_{31}$.

Зменшення напруги на виводах генератора в цьому випадку відбулося в результаті двох причин: спаду напруги в колі якоря і впливу розмагнічуючої реакції якоря. Вимірявши величину опору кола якоря r_a і підрахувавши спад напруги $I_a r_a$ можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження:

$$E = U + I_a R_a .$$

На рис. 2.8. ця ЕРС представлена відрізком be . ЕРС генератора при навантаженні менше, ніж у режимі холостого ходу ($be < de$), що

пояснюється впливом розмагнічуючої реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу з точки b проводиться відрізок bc паралельно осі абсцис, до перетинання з характеристикою холостого ходу. Отриманий у такий спосіб відрізок cf являє собою ЕРС генератора при навантаженні; а в режимі холостого ходу для створення цієї ЕРС необхідний струм збудження $I_{32} < I_{31}$. Отже, відрізок fe , рівний різниці струмів $(I_{31} - I_{32})$, являє собою величину струму збудження, що компенсує розмагнічуючий вплив реакції, якоря.

Сторони реактивного трикутника визначають фактори, що викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: сторона ab – спадання напруги в колі якоря, а сторона bc – вплив розмагнічуючої реакції якоря. Реактивний трикутник $a'b'c'$ побудований для іншого значення струму збудження (I_{33}). Сторона $a'b'$ трикутника залишилася незмінною ($a'b' = ab$), що порозумівається незмінністю струму навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася ($b'c' < bc$), тому що при меншому струмі збудження зменшився ступінь насичення магнітного кола генератора, а отже, і зменшилася дія розмагнічуючої реакції якоря.

Навантажувальні характеристики генераторів паралельного збудження за формою і змістом подібні до характеристик генераторів незалежного збудження.

Навантажувальну характеристику генератора послідовного збудження експериментально можна отримати лише за схемою незалежного живлення обмотки збудження.

Для генераторів змішаного збудження навантажувальні характеристики мають подібний вигляд, однак можуть розташовуватися вище характеристики холостого ходу, оскільки під навантаженням проявляється дія послідовної обмотки збудження.

Зовнішня характеристика генератора

Зовнішня характеристика відображає залежність вихідної напруги генератора U від струму навантаження I за сталої частоти обертання $n = \text{const}$ і сталого опору в колі збудження $R_3 = \text{const}$. Для генератора незалежного збудження це відповідає умові $I_3 = \text{const}$.

Номінальною зміною напруги генератора незалежного збудження називається зміна напруги на його затискачах при зміні навантаження від номінального до нуля при $n = \text{const}$ і $I_3 = \text{const}$.

Тому для зняття зовнішньої характеристики приводимо генератор в обертання з номінальною частотою обертання і встановлюємо такий струм збудження I_{3H} , щоб при $I = I_H$ ми мали на затискачах генератора $U = U_H$.

Потім підтримуючи $n = n_H = \text{const}$, розвантажуюмо генератор аж до холостого ходу. При цьому омічне спадання напруги на якорі $I_a r_a$ і реакція якоря зменшуються і відповідно незалежного збудження. росте напруга на затискачах генератора до значення $U = U_0$ (рис. 2.9).

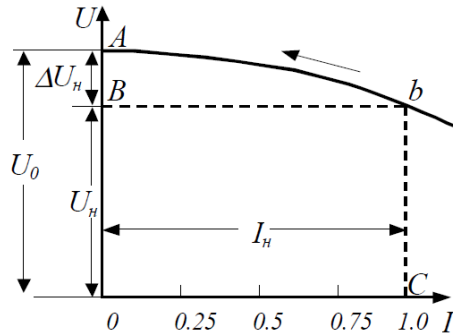


Рисунок 2.9 - Зовнішня характеристика генератора

Зміна напруги виражається у відсотках від номінальної напруги, тобто

$$\Delta U_H = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100\% = \frac{OA - OB}{OB} 100\% .$$

Як правило, для генераторів незалежного збудження $\Delta U_H = 5 - 10\%$.

Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження представлена на рис. 2.10 (крива 1). Там же представлена і зовнішня характеристика генератора незалежного збудження (крива 2).

З рис. 2.10 видно, що в генераторі паралельного збудження спадання напруги ΔU більше, ніж у генераторі незалежного збудження. Це пояснюється тим, що в генераторі паралельного збудження, крім омичного спаду напруги в обмотці якоря і реакції якоря, діє ще *третья* причина, а саме: при збільшенні навантаження струм збудження $I_3 = U / (R_a + R_3)$ зменшується пропорційно U (тому що $(R_a + R_3) = const$), тоді як у генераторі незалежного збудження $I_3 = const$.

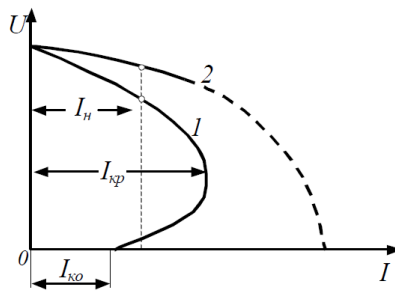


Рисунок 2.10 - Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

Цією ж причиною пояснюється і те, що характер кривих 1 і 2 на рис. 2.10. різний. При послідовному зменшенні опору зовнішнього кола навантажувальний струм I генератора незалежного збудження безупинно росте (продовження кривої 2), показано переривчастою лінією) і при короткому замиканні генератора ($U = 0$) досягає неприпустимих значень, що може привести до виникнення колового вогню на колекторі.

Навпаки, в генераторі паралельного збудження струм навантаження буде збільшуватися тільки до визначеного граничного або, інакше, *критичного* значення $I_{кр}$, що як правило не перевищує номінальний струм більше чим у 2-2,5 рази, після чого він починає зменшуватися разом із напругою, що продовжує падати. Дійсно, $I = U/R_H$, де R_H – опір зовнішнього, тобто навантажувального, кола якоря. Якщо зменшити R_H , то при цьому зменшується напруга на затискачах генератора U . Таким чином, струм I залежить від двох зустрічно діючих факторів – зменшення R_H і зменшення U . Спочатку, поки генератор ще відносно сильно не насичений, напруга U мало змінюється (див., наприклад, верхню частину характеристики холостого ходу на рис. 2.6); тому великий вплив робить зменшення опору R_H , і струм I росте; але в міру збільшення I , напруга U починає падати усе швидше, зрівнюючись, а потім перевищуючи вплив R_H ; відповідно до цього струм I , досягши свого критичного значення, починає падати.

При короткому замиканні напруга $U = 0$, струм збудження I_3 також дорівнює нулю, і по якорю тече струм короткого замикання $I_{ко}$, обумовлений тільки потоком залишкового намагнічування. Цей струм як правило менший I_H , і, отже, коротке замикання для генератора паралельного збудження є менш небезпечним, чим для генератора незалежного збудження.

Генератори паралельного збудження широко використовують в установках постійного струму, тому що відсутність збудника вигідно відрізняє їх від генераторів незалежного збудження. Номінальна зміна напруги генератора паралельного збудження складає 10-30%.

Зовнішня характеристика генератора послідовного збудження має вид кривої 2 на рис. 2.11. За загальним правилом, вона представляє собою залежність напруги на затискачах генератора U від струму навантаження I при $n = const$.

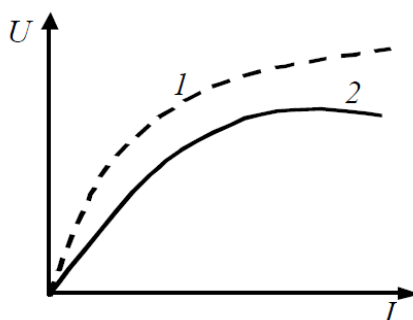


Рисунок 2.11 - Зовнішня характеристика генератора послідовного збудження

Якби в генераторі послідовного збудження не було ні омичного спаду напруги в якорі, ні реакції якоря, то його зовнішня характеристика збіглася б з характеристикою холостого ходу 1 (переривчаста лінія на рис. 2.11).

В дійсності крива 2 завжди проходить нижче кривої 1, причому спочатку напруга змінюється майже прямо пропорційно струму навантаження, тому що тут генератор ще не насичений але потім при подальшому збільшенні струму I , а отже, і струму збудження відбувається насичення сталі, і напруга збільшується вже повільніше. При великому насиченні, коли потік полюсів збільшується дуже мало, а потік реакції якоря і спаду напруги в якорі ростуть пропорційно струму I , напруга при подальшому навантаженні зменшується.

Через те, що напруга генератора послідовного збудження різко змінюється зі зміною навантаження, у практиці він не застосовується як джерело струму, тому що до генераторів майже завжди пред'являється вимога тримати напругу більш-менш постійною.

Зовнішні характеристики генератора змішаного збудження представлені на рис. 2.12.

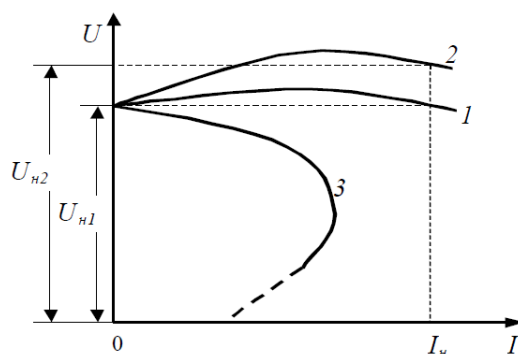


Рисунок 2.12- Зовнішні характеристики генератора змішаного характеру

Вибираючи число витків послідовної обмотки збудження так, щоб при номінальному струмі її МРС могла компенсувати дію омичного спаду напруги і реакції якоря генератора, одержана при номінальному навантаженні напруга U , була рівна напрузі холостого ходу. У цьому випадку зовнішня характеристика генератора має вид змішаної кривої 1 на рис. 2.12 і генератор змішаного збудження може бути названий нормально напруженим.

Якщо поставлена умова підтримувати постійну напругу на затискачах приймача, для чого потрібно компенсувати спад напруги в лінії, то необхідно збільшити число витків послідовної обмотки збудження. У цьому випадку зовнішня характеристика здобуває вид кривої 2 на рис. 2.12, де генератор може бути названий перенапруженим.

При зустрічному включенні обмоток МРС послідовної обмотки спрямована зустрічно відносно МРС паралельної обмотки (крива 3). Противвімкнення застосовується в спеціальних випадках, коли потрібно одержати круто спадаючу зовнішню характеристику, як наприклад, у зварювальних генераторах, прожекторних установках і т.д.

Якщо провести порівняльний аналіз зовнішніх характеристик генераторів постійного струму при різних способах збудження, то їх можна представити наступним сімейством кривих (рис. 22.13).

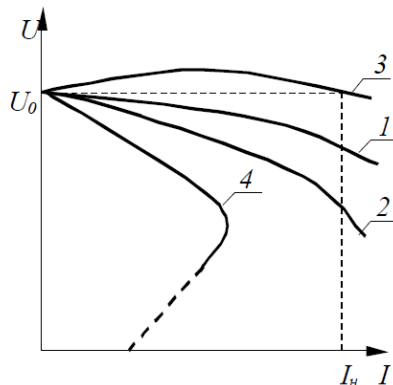


Рисунок 2.13 - Зовнішні характеристики генераторів незалежного (1), паралельного (2), змішаного при узгодженому включенні обмоток (3), змішаного при зустрічному включенні обмоток (4).

Регульовальна характеристика

Ця характеристика являє собою залежність струму збудження від струму навантаження при постійній частоті обертання $n = const$ і постійній напрузі на виході генератора $U = const$.

Бажаючи підтримати напругу на затискачах генератора постійною, ми повинні, відповідно до зовнішньої характеристики, зменшувати струм збудження при знятті навантаження і збільшувати його при збільшенні останнього.

На рис. 22.14 показана регульовальна характеристика генератора незалежного збудження, знята при збільшенні навантаження від нуля до номінального. В цьому випадку зміна струму збудження визначається відношенням:

$$\Delta I_{\text{зн}} = \frac{I_{\text{зн}} - I_{\text{зо}}}{I_{\text{зо}}}.$$

Згідно приведених на рис. 2.13. характеристик, у генераторів незалежного, паралельного і змішаного збудження при зустрічному включенні обмоток збудження, вихідна напруга зменшується при збільшенні навантаження. Тому, щоб підтримати його на визначеному рівні, у цих генераторів необхідно з ростом навантаження збільшувати струм збудження (рис. 2.15.).

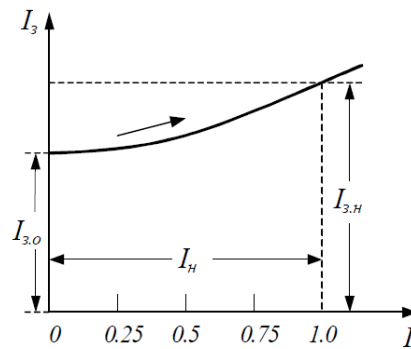


Рисунок 2.14 - Регульовальна характеристика генератора незалежного збудження.

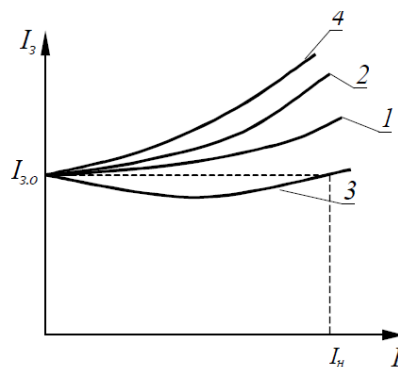


Рисунок 2.15 - Регульовальні характеристики генераторів: незалежного (1), паралельного (2), змішаного при узгодженому включенні обмоток (3), змішаного при зустрічному включенні обмоток (4).

Умови самозбудження генераторів постійного струму

У генераторів паралельного, послідовного і змішаного збудження вихідна напруга утвориться в процесі самозбудження. Процес самозбудження заснований на тому, що в машині практично завжди існує невеликий – порядку 1-3% від нормального – потік залишкового намагнічування $\Phi_{\text{зал}}$. Якщо ми приведемо якор в обертання з якою-небудь, наприклад номінальною, частотою обертання, то під дією цього потоку в обмотці якоря виникає невелика ЕРС і по колу збудження потече невеликий струм, що створить додатковий потік намагнічування $\Phi_{\text{д}}$. В залежності від напрямку струму в обмотці збудження потік $\Phi_{\text{д}}$ може бути спрямований зустрічно щодо потоку $\Phi_{\text{зал}}$ або узгоджено з ним. Генератор може самозбуджуватися тільки при узгодженому напрямку обох потоків, іншими словами, процес самозбудження генератора може йти тільки в одну сторону, обумовлену напрямком потоку $\Phi_{\text{зал}}$.

При узгодженому напрямку потоків результуючий потік машини збільшується, це приводить до збільшення ЕРС, що наводиться у якорі і викликає подальше збільшення струму збудження і потоку машини.

Таким чином, щоб виник процес самозбудження необхідні наступні умови:

- В магнітному колі генератора повинен існувати потік залишкового намагнічування.

- Обмотка збудження повинна бути включена таким чином, щоб створюваний нею магнітний потік був спрямований узгоджено з потоком залишкового намагнічування.
- Опір кола збудження повинний бути менше деякого критичного значення $R_3 < R_{3.кр.}$.

Необхідність виконання останньої умови розглянемо на прикладі генератора паралельного збудження, що працює в режимі холостого ходу (рис. 2.16.).

Коли генератор приводиться в обертання приводним двигуном, починається процес самозбудження. У цьому перехідному процесі для кола збудження справедливо наступне рівняння напруг:

$$u_3 = i_3 R_3 + \frac{dL_3 i_3}{dt}$$

де u_3 – миттєве значення напруги в колі збудження; i_3 – миттєве значення струму в колі збудження; $R_3 = R_{03} + R_{пр}$ – опір кола збудження; R_{03} – активний опір обмотки збудження; $R_{пр}$ – опір регулювального реостата в колі збудження; L_3 – індуктивність обмотки збудження.

Коли процес самозбудження закінчиться, то в сталому режимі: $u_3 = U_3$, $i_3 = I_3$ – сталі значення напруги і струму в колі збудження.

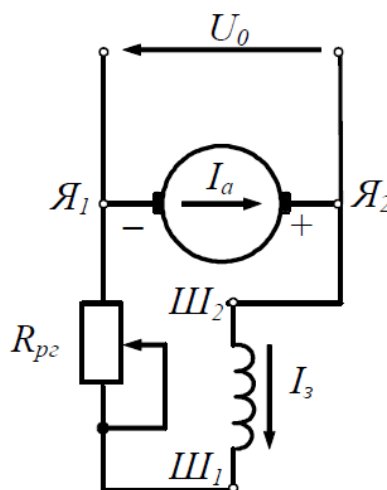


Рисунок 2.16 - Схема генератора паралельного збудження

Опір кола збудження, при якому машина вже не самозбуджується, називається *критичним опором*.

Так само виробляється самозбудження і генераторів змішаного збудження, тому що в них головну роль грає паралельна обмотка збудження.

При самозбудженні генератора послідовного збудження зовнішнє коло повинний бути обов'язково замкнутий, тому що в противному випадку навантажувальний струм, а стало бути, і струм збудження будуть дорівнювати нулю.

Висновки.

- Генератори постійного струму (ГПС) — це електричні машини, які перетворюють механічну енергію обертання в електричну енергію постійного струму.

- За способом збудження ГПС поділяються на:

генератори з незалежним збудженням;

генератори з самозбудженням (паралельним, послідовним і змішаним);

рідше — генератори з постійними магнітами.

- Незалежне збудження забезпечує стабільну напругу і широке регулювання, але потребує окремого джерела живлення для обмотки збудження.
- Паралельне (шунтове) збудження є найбільш поширеним — забезпечує стійку роботу і не потребує окремого збудника.
- Послідовне (серієсне) збудження дає нестабільну напругу, яка різко змінюється з навантаженням, тому застосовується обмежено.
- Змішане (компаундне) збудження поєднує переваги попередніх схем і дозволяє автоматично підтримувати сталу напругу при зміні навантаження.
- Основні рівняння генератора описують залежність між ЕРС, струмом якоря, опором обмоток і вихідною напругою:

$$U = E_a - I_a R_a, \quad E_a = c_e n \Phi$$

- Електромагнітний момент генератора є гальмівним і врівноважується моментом привідного двигуна.

$$M_{\text{ем}} = c_m I_a \Phi$$

- Характеристики генератора:

Холостого ходу — залежність $U_0 = f(I_z)$ при $I=0$;

Короткого замикання — $I_k = f(I_z)$ при $U=0$;

Навантажувальна — $U = f(I_z)$ при $I=\text{const}$;

Зовнішня — $U = f(I)$;

Регульовальна — $I_z = f(I)$ при $U=\text{const}$.

- Самозбудження генератора можливе лише при виконанні трьох умов:

наявність залишкового магнітного потоку;

правильне (узгоджене) підключення обмотки збудження;

опір кола збудження менший за критичний $R_z < R_{\text{зкр}}$.

- Характеристики генераторів різних типів дозволяють визначити їхню придатність для конкретних споживачів:

незалежне збудження — стабільна напруга, але складна система;

паралельне — найпоширеніше в практиці;

послідовне — для зварювальних і спеціальних установок;

змішане — для систем, що потребують стабільної напруги під навантаженням.

Контрольні питання.

1. Що таке генератор постійного струму і який принцип його роботи?
2. Як класифікуються генератори постійного струму за способом збудження?
3. У чому полягає відмінність між незалежним і самозбудженням генератора?
4. Як підключається обмотка збудження у генераторі незалежного збудження?
5. Яке співвідношення між струмом якоря, струмом збудження і струмом навантаження у генераторі паралельного збудження?
6. Чому генератори послідовного збудження не застосовують як джерела живлення?
7. Як працює генератор змішаного (компаундного) збудження?
8. Запишіть основне рівняння електричної рівноваги генератора постійного струму.
9. Від яких факторів залежить вихідна напруга генератора?
10. Як можна регулювати напругу генератора постійного струму?
11. Що таке характеристика холостого ходу і що вона відображає?
12. Як знімається характеристика короткого замикання генератора?
13. Які основні відмінності навантажувальної характеристики від зовнішньої?
14. Як побудувати реактивний трикутник і що він показує?
15. Які причини зниження напруги генератора при навантаженні?
16. Що таке номінальна зміна напруги і в яких межах вона лежить?
17. Чим пояснюється критичний струм у генераторі паралельного збудження?
18. У яких випадках застосовується генератор послідовного збудження?
19. Як змінюється форма зовнішньої характеристики при узгодженому й зустрічному включенні обмоток у генераторі змішаного збудження?
20. Назвіть основні умови самозбудження генератора постійного струму.
21. Що таке критичний опір кола збудження?
22. Як впливає напрям залишкового потоку на процес самозбудження?
23. Як на практиці забезпечують правильне підключення обмотки збудження?
24. Для яких типів генераторів характерна найменша зміна напруги при навантаженні?
25. Яке практичне значення мають регульовальні характеристики генераторів?

Використана література.

1. Колотіло В. І., Донець О. В. Теорія електропривода : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка). Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 148 с.

2. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
3. Гайденко Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
4. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
5. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331с.

ТЕМА 3. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Робота машини постійного струму в режимі двигуна. Схеми збудження. Пуск двигунів постійного струму. Робочі та механічні характеристики двигунів постійного струму. Способи регулювання швидкості двигунів з паралельним, послідовним та змішаним збудженням. Безколекторні двигуни постійного струму. Висновки.

Основні поняття

Електричні машини характеризуються властивістю оборотності, тобто здатністю працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Якщо машину постійного струму під'єднати до джерела живлення постійної напруги, у її обмотці збудження та обмотці якоря виникають електричні струми. Унаслідок взаємодії магнітного поля збудження зі струмом якоря на його валу створюється електромагнітний момент. На відміну від генераторного режиму, де цей момент є гальмівним, у режимі двигуна він стає обертальним, змушуючи якір обертатися (рис. 3.1). Таким чином, машина постійного струму в режимі двигуна споживає електричну енергію з мережі та перетворює її на механічну.

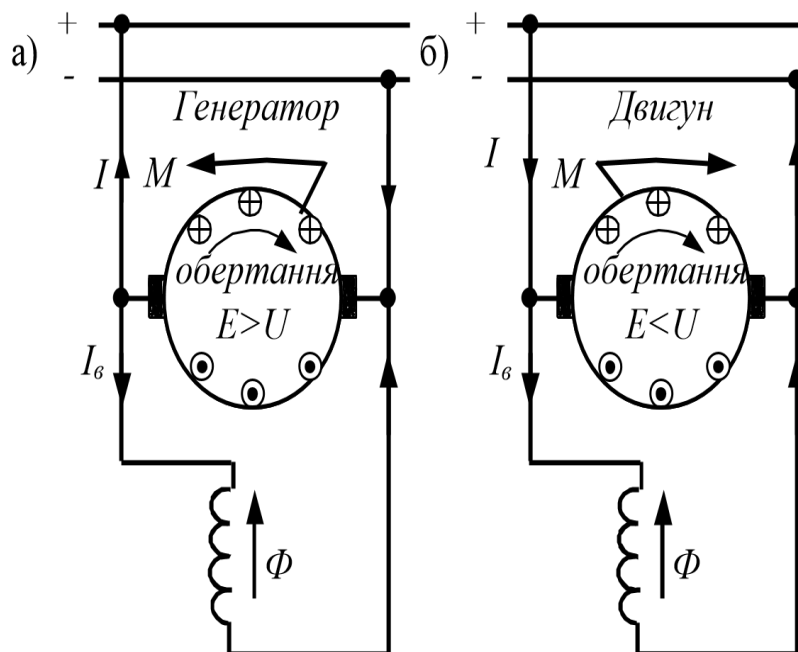


Рисунок 3.1 - Машина паралельного збудження в режимі генератора (а) і в режимі двигуна (б)

У процесі роботи двигуна якір обертається в магнітному полі, створеному обмоткою збудження. Під час цього в провідниках якоря індукуються електрорушійна сила (ЕРС), напрямок якої визначають за правилом правої руки. За своєю фізичною природою ця ЕРС така сама, як і в генераторі, але в режимі двигуна вона спрямована назустріч струму, що протікає в обмотці якоря. Тому її називають протиелектрорушійною силою (противо-ЕРС) (рис. 3.2).

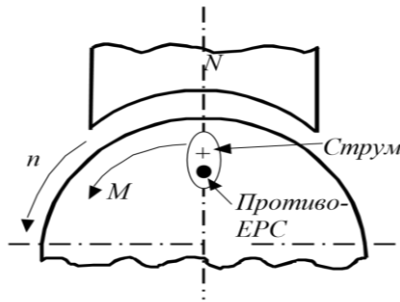


Рисунок 3.2 - Напрямок противо-ЕРС у двигуні.

Подібно до генераторів, двигуни постійного струму класифікують за способом збудження магнітного поля.

Розрізняють такі основні типи:

- незалежного збудження, коли струм у обмотці збудження надходить від окремого джерела постійної напруги;
- паралельного збудження, де обмотка збудження підключається паралельно до кола якоря;
- послідовного збудження, коли обмотка збудження ввімкнена послідовно з якорем;
- змішаного (компаундного) збудження, що поєднує властивості паралельного й послідовного типів.

Двигуни постійного струму широко застосовуються в системах електроприводу, особливо там, де необхідне плавне та широке регулювання частоти обертання.

Завдяки простоті керування, високій точності регулювання швидкості й великому пусковому моменту такі двигуни мають суттєві переваги перед двигунами змінного струму, особливо у випадках, коли потрібна стабільна робота при змінних навантаженнях або частих пусках і зупинках.

Основні рівняння двигунів постійного струму

Незалежно від типу збудження, у сталому режимі роботи двигуна постійного струму під дією навантаження виконуються такі основні рівняння, що описують його електричні та механічні характеристики:

Рівняння напруг для кола якоря

$$U = E_a + I_a R_a,$$

де U - підведена до двигуна напруга; $E_a = c_e n \Phi$ - ЕРС обмотки якоря; $I_a R_a$ спад напруги в колі якоря.

Струм кола якоря

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}.$$

Частота обертання двигуна (з огляду на те, що $E_a = c_e n \Phi$)

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi},$$

де Φ - магнітний потік в повітряному зазорі на кожному полюсному поділці.

Електромагнітний момент двигуна визначається залежністю

$$M_{\text{ем}} = C_m I_a \Phi,$$

де $C_m = PN/2pa$ - постійна машини.

Електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$ приводить якір двигуна в обертання, передаючи механічну енергію виконавчому механізму через вал.

На вал двигуна при цьому діють кілька моментів:

- електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$ — створює обертання;
- момент холостого ходу M_0 — зумовлений механічними втратами (тертя, вентиляційні опори) та магнітними втратами в сталі. Його значення зазвичай не перевищує 2–6 % від номінального моменту;
- корисний момент M_2 — момент опору робочого механізму, який з'єднано з валом двигуна;
- динамічний момент M_d — виникає при зміні частоти обертання внаслідок інерції обертових мас двигуна й механізму, що ним приводиться:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt},$$

де J - момент інерції всіх обертових частин агрегату, приведений до валу двигуна і віднесений до кутової частоти обертання ω .

Як правило моменти M_0 і M_2 розглядають спільно як суму

$$M_0 + M_2 = M_{\text{ст}},$$

де $M_{\text{ст}}$ - *статичний момент* опору обертанню двигуна.

У загальному випадку рівняння моментів двигуна

$$M_{\text{ем}} = M_0 + M_2 \pm M_d,$$

або

$$M_{\text{ем}} = M_{\text{ст}} \pm M_d.$$

Знак “плюс” чи “мінус” у динамічного моменту визначається характером зміни частоти обертання: при збільшенні частоти обертання M_d складається з моментом $M_{\text{ст}}$ (знак “плюс”), а при зменшенні частоти обертання M_d діє проти моменту $M_{\text{ст}}$ (знак “мінус”).

При незмінній частоті обертання якоря ($\frac{d\omega}{dt} = 0$) динамічний момент $M_d = 0$, тоді рівняння моментів двигуна:

$$M_{\text{ем}} = M_0 + M_2 = M_{\text{ст}},$$

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

Електромагнітний момент двигуна $M_{\text{ем}}$ прямо пропорційний електромагнітній потужності, яку розвиває машина $P_{\text{ем}} = E_a I_a$, а тому

$$M_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{ем}}}{\omega} = \frac{P_{\text{ем}}}{2\pi n/60} = \frac{60}{2\pi} \frac{P_{\text{ем}}}{n} = 9.55 \frac{P_{\text{ем}}}{n}.$$

Корисний момент M_2 відповідно визначається корисною потужністю на валу P_2 і частотою обертання n

$$M_2 = 9.55 \frac{P_2}{n},$$

де P_2 - корисна потужність двигуна (потужність на валу), кВт; M_2 - корисний момент, Н·м; n - частота обертання, об/хв.

Пуск двигунів постійного струму

Пускові властивості двигуна постійного струму, подібно до машин змінного струму, характеризуються низкою основних показників::

- кратністю пускового струму I_n/I_H ;
- кратністю пускового моменту M_n/M_H ;
- тривалістю пуску $t_n(c)$;
- економічністю пускової операції, з погляду витрат на устаткування і наступні експлуатаційні витрати.

Пускові характеристики значною мірою залежать від способу запуску двигуна, який визначає як електричні, так і механічні параметри процесу розгону.

Розглянемо характеристику способів пуску в хід двигунів постійного струму.

Пряме включення в мережу Цей спосіб пуску простий, не вимагає спеціальної апаратури. Однак має той істотний недолік, що в момент вмикання двигуна в мережу відбувається кидок пускового струму.

Цей пусковий струм визначається:

$$I_n = \frac{U - E_a}{R_a},$$

де $E_a = c_e n \Phi = 0$, тому що $n = 0$.

Отже:

$$I_n = \frac{U}{R_a}.$$

Оскільки опір кола якоря R_a зазвичай дуже малий (менше 1 Ом), пусковий струм може перевищувати номінальний у 10 і більше разів.

Такий спосіб пуску допустимий лише для двигунів малої потужності, у яких опір обмотки якоря є відносно великим, що природним чином обмежує величину пускового струму.

Реостатний пуск. При цьому способі пуску в момент включення двигуна в мережу в коло якоря включений додатковий опір пускового реостату R_n . При цьому пусковий струм обмежується величиною

$$I_n = U / (R_a + R_n).$$

Величину R_n підбирають так, щоб кратність пускового струму не перевищувала:

$$I_n/I_H = 1,4 \div 1,7 \text{ - для двигунів понад } 1000 \text{ кВт};$$

$$I_n/I_H = 1,7 \div 2,5 \text{ - для двигунів до } 1000 \text{ кВт}.$$

Принципова схема цього способу пуску на прикладі двигуна паралельного збудження приведена на рис. 3.3,а.

Пуск здійснюється шляхом замикання лінійного контактора, при цьому пусковий реостат послідовно підключається до кола якоря.

У процесі розгону двигуна ступені реостата поступово шунтуються (ручним або автоматичним способом), зменшуючи додатковий опір доти, доки після завершення пуску весь R_n не буде повністю вимкнений із кола.

Завдяки простоті, надійності та ефективному обмеженню пускового струму реостатний пуск є найпоширенішим способом запуску двигунів постійного струму.

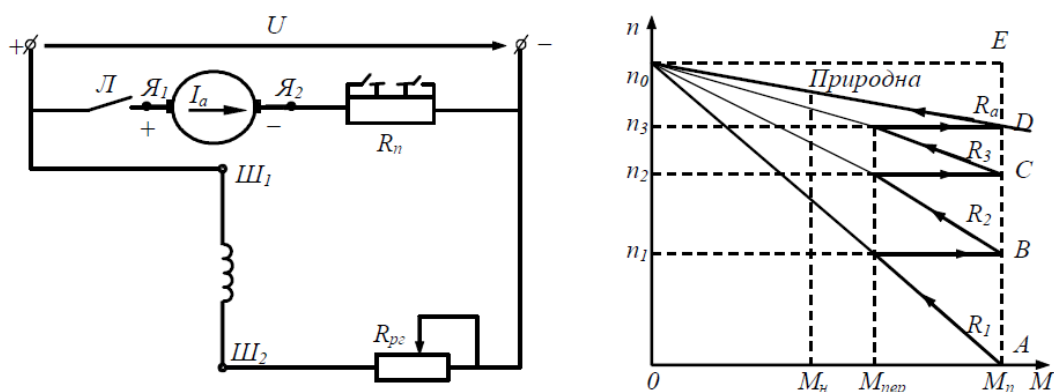


Рисунок 3.3 - Принципова схема пуску (а) і побудова графіка пускового моменту (б) двигуна постійного струму паралельного збудження

Пуск при зниженій напрузі.

Цей спосіб застосовується переважно в системах типу “генератор – двигун” (Г–Д), де двигун живиться від окремого генератора постійного струму. Під час пуску напруга на затискачах якоря зменшується, що дозволяє обмежити величину пускового струму:

$$I_n = U/R_a.$$

Таким чином, струм пуску можна обмежити до будь-якого заданого значення шляхом регулювання напруги генератора.

Однак через складність та вартість обладнання цей спосіб використовується переважно у спеціальних або високоточних електроприводах.

У сучасних системах аналогічний принцип реалізується за допомогою керованих тиристорних випрямлячів, що плавно змінюють напругу на якорі під час пуску.

Пуск в хід двигунів постійного струму послідовного збудження в основному протікає так само, як і паралельного, з тією, однак, істотною різницею, що двигун послідовного збудження ні в якому випадку не можна пускати вхолосту. Це впливає з властивості його швидкісної характеристики. Дійсно, в двигуні послідовного збудження струм збудження дорівнює струму в якорі $I_f = I_a$ маємо:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi}.$$

При зменшенні навантаження, тобто $M_{\text{ст}}$, одночасно буде зменшуватися струм I_a і потік Φ , а швидкість обертання буде рости. При значному зменшенні навантаження збільшення частоти обертання може перевищити механічно припустимі межі, і двигун може потерпіти аварію (розрив бандажів, псування обмотки і т.д.). Тому двигуни постійного струму послідовного збудження запускають під навантаженням не менш як $0.25P_H$.

Робочі і механічні характеристики двигунів постійного струму

Робочими характеристиками двигуна постійного струму називають залежності основних параметрів — частоти обертання n , електромагнітного моменту M та коефіцієнта корисної дії η — від корисної потужності на валу P_2 при постійній напрузі живлення $U = \text{const}$.

При знятті робочих характеристик двигуна паралельного збудження напруга $U = U_H = \text{const}$, а опір регулювального реостата в колі збудження $R_{\text{пр}}$ підбирається так, щоб при номінальній напрузі і номінальному навантаженні двигун обертається з номінальною частотою обертання. У цьому положенні реостат $R_{\text{пр}}$ залишається увесь час при знятті робочих характеристик, тобто $R_{\text{пр}} = \text{const}$, відповідно чому

$$I_3 = \frac{U}{R_3 + R_{\text{пр}}} = \text{const}$$

Робочі характеристики двигуна паралельного збудження показані двигуна на рис. 3.4.

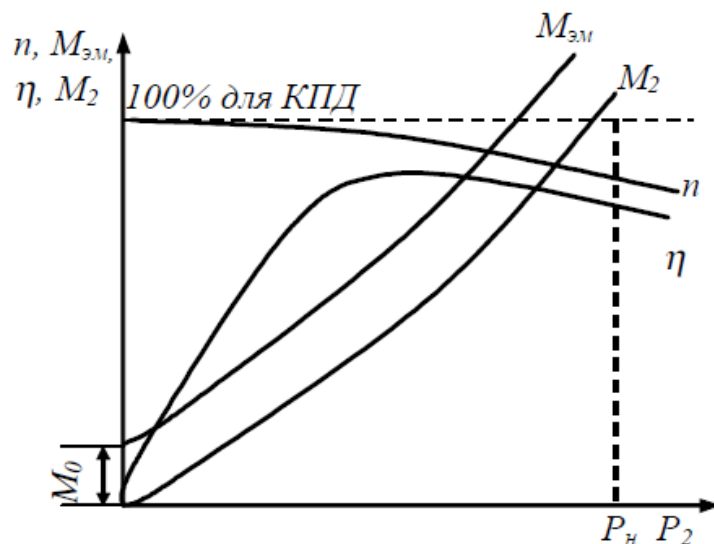


Рисунок 3.4 - Робочі характеристики двигуна паралельного збудження

Розглянемо причини, що визначають вид швидкісної характеристики двигуна паралельного збудження

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

Оскільки в процесі роботи U і I_3 є постійними, то в цих умовах на частоту обертання двигуна паралельного збудження діють дві причини, а саме:

- 1) омичний спад напруги в обмотці якоря $I_a R_a$;
- 2) реакція якоря.

При збільшенні навантаження, тобто струму I_a , перша причина прагне зменшити частоту обертання двигуна, тоді як друга, навпаки, збільшити її, оскільки при звичайних умовах реакція якоря діє розмагнічуючим образом . У залежності від того, яка з цих двох причин переважає, частота обертання двигуна або зменшиться або збільшиться при збільшенні навантаження. У нормальних умовах переважає спад напруги на якорі, тому швидкісна характеристика має вигляд майже прямої лінії, слабко нахиленої до осі абсцис. У типовому діапазоні навантажень від холостого ходу до номінального частота обертання зменшується лише на 3–8 %, що свідчить про жорсткий характер характеристики двигуна паралельного збудження.

Такий вигляд швидкісної характеристики є однією з найхарактерніших властивостей двигуна паралельного збудження.

Через незначне зниження швидкості при зміні навантаження ця характеристика називається жорсткою.

Маючи на увазі характер залежності $n = f(P_2)$, неважко пояснити характеристику $M_2 = f(P_2)$. Справді, якби частота обертання двигуна n була постійною, то момент M_2 був би прямо пропорційний потужності P_2 . Графічно така залежність була б показана прямою, що виходить з початку координат. В дійсності частота обертання n зі збільшенням навантаження трохи падає; тому $M_2 = f(P_2)$ трохи відгинається догори.

Момент $M_{ем} = M_2 + M_0 = M_{ст}$. При $I_3 = const$ і $n \approx const$ момент холостого ходу $M_0 \approx const$. Отже, крива $M_{ем} = f(P_2)$ проходить вище кривої $M_2 = f(P_2)$ на деяку постійну величину, тобто паралельно цій кривій.

Коефіцієнт корисної дії двигуна, що характеризується залежністю $\eta = f(P_2)$, має типовий вигляд. При збільшенні навантаження від холостого ходу ККД швидко зростає, оскільки частка постійних втрат у загальному балансі енергії зменшується. Надалі, у діапазоні навантажень від 0,75 до 1,25 номінальної потужності, значення η залишається практично сталим, близьким до максимального.

Типові орієнтовні значення ККД:

- для двигунів малої потужності — $\eta = 0,7 \div 0,8$;
- для двигунів великої потужності — $\eta = 0,85 \div 0,9$.

Подібні робочі характеристики спостерігаються і в двигунах незалежного збудження, оскільки їхні електромагнітні процеси аналогічні.

Швидкісна характеристика двигуна послідовного збудження має принципово інший характер порівняно з двигуном паралельного збудження (рис. 3.5).

Коли навантаження збільшується, струм якоря I_a зростає, а разом із ним збільшується й магнітний потік Φ , оскільки для цього типу двигуна $\Phi = f(I_a)$. Унаслідок цього частота обертання n помітно зменшується зі зростанням навантаження. На початковій ділянці, коли магнітопровід ще не насичений, швидкість падає швидше; після досягнення насичення зменшення частоти обертання стає повільнішим.

Такий тип характеристики називають м'якою, і саме він є основною особливістю двигуна послідовного збудження. На відміну від паралельного двигуна, у якому магнітний потік Φ майже не залежить від навантаження, у послідовному двигуні потік змінюється відповідно до кривої намагнічування залежно від струму якоря I_a .

Відповідно до швидкісної характеристики, крива електромагнітного моменту двигуна послідовного збудження має виражений нелінійний характер (рис. 3.5).

$$M_{\text{ем}} = f(P_2) = C_M I_a \Phi$$

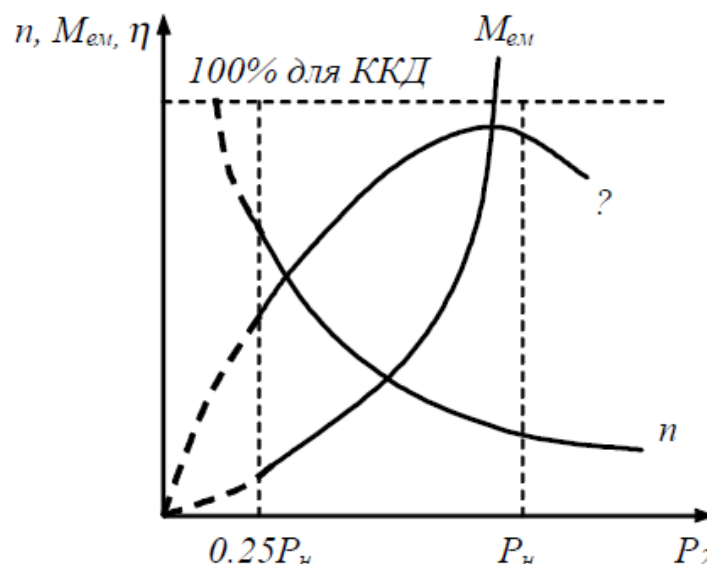


Рисунок 3.5 - Робочі характеристики двигуна послідовного збудження.

У режимі малих навантажень, коли магнітопровід ще не насичений, магнітний потік пропорційний струму якоря ($\Phi \sim I_a$)

Отже,

$$M_{\text{ем}} = C'_M I_a^2.$$

Тобто, крива $M = f(P_2)$ в початковій своїй частині є параболою. Навпаки, при сильному насиченні можна вважати, що потік практично не залежить від I_a , тобто $\Phi \approx \text{const}$. У цих умовах $M_{\text{ем}} \propto I_a$, тобто момент обертання змінюється майже пропорційно току, як у двигуна паралельного збудження.

Завдяки цій властивості двигуни послідовного збудження здатні розвивати дуже великі пускові моменти, що приблизно пропорційні квадрату струму. Такі характеристики роблять їх особливо ефективними для

підйомно-транспортних механізмів, електровозів, кранів, а також у тих випадках, де потрібна висока перевантажувальна здатність (до 300 % від номінального моменту).

Варто підкреслити характерну різницю у поведінці двигунів паралельного та послідовного збудження при зміні навантаження.

Припустімо, що момент двигуна збільшується у два рази.

- У двигуні паралельного збудження, де магнітний потік є сталим ($\Phi = const$), згідно з рівнянням $M = C_M \Phi I_a$ струм якоря I_a також зростає у два рази. У цьому випадку потужність двигуна приблизно подвоюється, тоді як частота обертання практично не змінюється.
- У двигуні послідовного збудження, що працює в ненасиченому режимі ($\Phi \sim I_a$), для подвоєння моменту достатньо збільшення струму лише в $\sqrt{2}$ рази.
- При цьому потужність двигуна також зростає в $\sqrt{2}$ рази, але швидкість обертання зменшується у такій же пропорції.

Отже, за коефіцієнтом корисної дії (віддачею) обидва типи двигунів практично рівноцінні, однак їхні швидкісні властивості істотно відрізняються: паралельного збудження — стабільний, послідовного збудження — більш чутливий до зміни навантаження.

Двигуни змішаного (компаундного) збудження поєднують у своїй конструкції обмотку паралельного (шунтового) та обмотку послідовного (серієсного) збудження.

Магніторушійні сили (МРС) цих обмоток добирають так, що одна з них є основною (створює не менше 70 % загальної МРС машини), а друга — допоміжною, яка коригує характеристики залежно від умов роботи.

Існують два основні варіанти вмикання обмоток:

- погоджене збудження — коли МРС обох обмоток спрямовані в один бік і додаються, посилюючи загальний магнітний потік;
- зустрічне (диференціальне) збудження — коли МРС мають протилежні напрямки і віднімаються, зменшуючи результуючий потік.

Для ненасиченої машини, що відповідно додаванню або вирахуванню МРС паралельної і послідовної обмоток збудження, складаються або віднімаються створювані цими обмотками потоки $\Phi_{ш}$ і Φ_c , маємо:

$$\Phi = \Phi_{ш} \pm \Phi_c; M_{ем} = C_M I_a (\Phi_{ш} \pm \Phi_c)$$
$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e (\Phi_{ш} \pm \Phi_c)}.$$

При погодженому включенні обмоток збудження (рис. 3.6, крива 2) характеристики двигуна змішаного збудження займають проміжне положення між характеристиками двигунів паралельного (крива 1) та послідовного (крива 3) збудження, але за формою вони ближчі до шунтового двигуна. Такі машини поєднують достатню жорсткість швидкісної характеристики з можливістю підвищення пускового моменту.

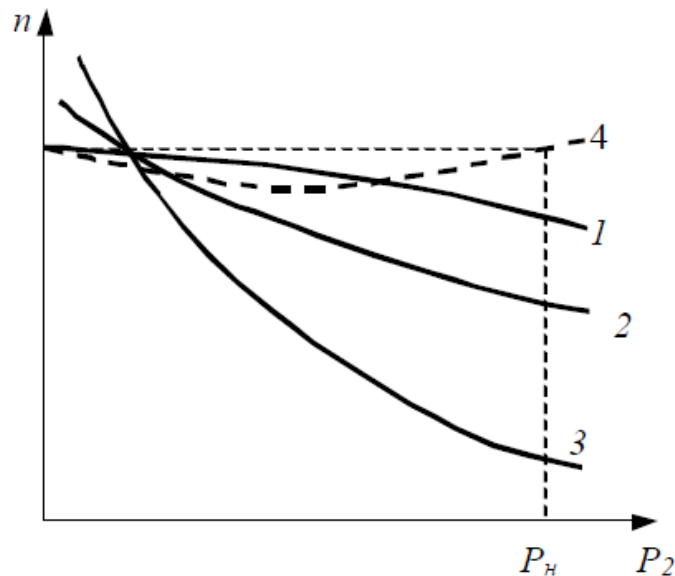


Рисунок 3.6 - Швидкісні характеристики двигунів постійного струму при різних способах збудження

При зустрічному (диференціальному) включенні умови роботи двигуна погіршуються. У момент пуску, коли струм якоря великий, дія послідовної обмотки може послабити магнітне поле, що призводить до зменшення збудження і навіть до неможливості запуску. Щоб запобігти цьому, послідовну обмотку збудження під час пуску тимчасово закорочують.

Зустрічне включення застосовують рідше — переважно у випадках, коли необхідно забезпечити сталу частоту обертання при зміні навантаження (рис. 3.6, крива 4). Для цього підбирають параметри послідовної обмотки так, щоб її розмагнічувальна дія разом із реакцією якоря компенсувала спад напруги в колі якоря, стабілізуючи швидкість двигуна.

Механічна характеристика двигуна являє собою залежність частоти обертання від обертового (електромагнітного) моменту на валу, тобто $n = f(M)$ при $I_3 = \text{const}$ і $U = \text{const}$.

Підставивши в рівняння швидкості значення струму якоря з виразу для обертового моменту $M = C_M I_a \Phi$, одержимо

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{R_a}{C_e C_M \Phi^2}$$

або

$$n = n_0 - M \frac{R_a}{C_e C_M \Phi^2}$$

де $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ — частота обертання двигуна при ідеальному холостому ході (коли $M = 0$).

Механічна характеристика двигуна паралельного збудження (рис. 3.7) — жорстка [при номінальному навантаженні зниження частоти обертання не перевищує $(0,05, 0,1)n_0$] графік її практично є прямою лінією.

Відповідно двигун, крім природної механічної характеристики 1 при $R_d = 0$ має ще і штучні (чи реостатні) характеристики, що одержують введенням в коло якоря додаткового опору R_d (характеристика 2 на рис. 3.7).

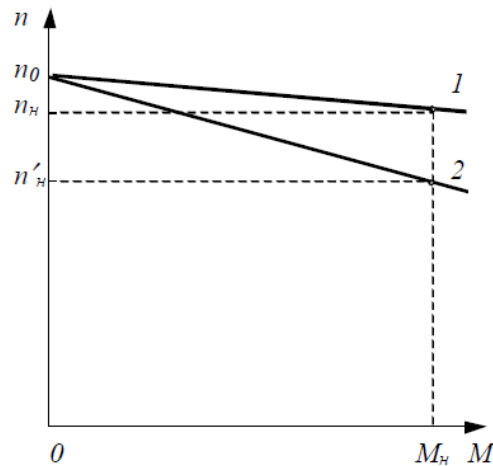


Рисунок 3.7 - Механічні характеристики двигуна паралельного збудження.

Для двигуна послідовного збудження частота обертання обернено пропорційна магнітному потоку машини. Це співвідношення описується рівнянням

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_z)}{C_e \Phi(I)}$$

де R_z – опір обмотки збудження.

Природна механічна характеристика двигуна $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ графічно зображена на рис. 3.8 (крива 1), має м'яку характеристику. Поки магнітопровід машини не насичений магнітний потік пропорційний струму якоря, тобто $\Phi = \alpha I_a$. Отже, обертальний момент якоря $M = C_M I_a \Phi = C_M \alpha I_a^2$.

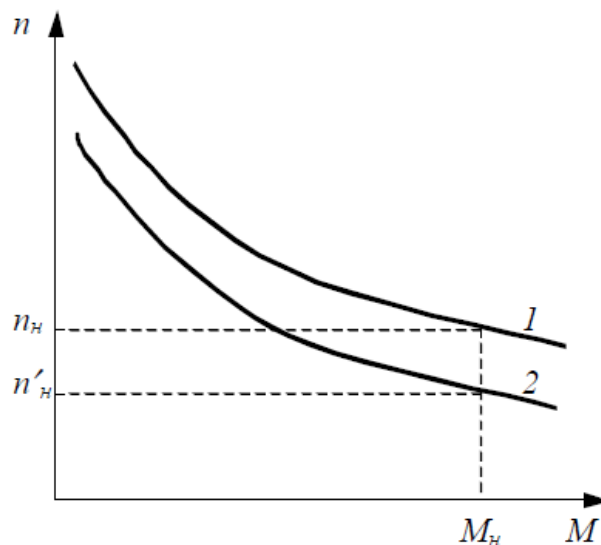


Рисунок 3.8 - Механічні характеристики двигуна послідовного збудження.

У результаті частота обертання двигуна зменшується за гіперболічним законом зі зростанням моменту навантаження.

Після насичення сталі магнітопроводу потік Φ змінюється незначно, тому крива $n = f(M)$ стає майже паралельною осі швидкості n . Таке уповільнення спаду швидкості пояснюється насиченням магнітопроводу та падінням напруги на опорах кола якоря $I_a R_a$.

Штучні механічні характеристики двигуна послідовного збудження отримують шляхом введення в коло якоря додаткового опору R_n .

У цьому випадку швидкість обертання зменшується, а крива (рис. 3.8, крива 2) демонструє зниження “жорсткості” характеристики через додаткові втрати напруги на пусковому резисторі.

Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

Характеристики регулювання швидкості електродвигунів постійного струму визначаються низкою параметрів, зокрема:

а) межами регулювання частоти обертання — співвідношенням максимальної швидкості до мінімальної $D = \frac{n_{max}}{n_{min}}$;

б) економічністю регулювання, тобто початковими витратами на апаратуру і подальшими експлуатаційними витратами;

в) характером регулювання — плавним або ступінчастим;

г) простотою та надійністю регулюючої системи і керуючих операцій.

Загальний вираз для частоти обертання двигуна має вигляд:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_{pr})}{C_e \Phi}.$$

Із цього рівняння випливає, що змінювати швидкість обертання можна трьома основними способами:

- зміною опору в колі якоря;
- зміною магнітного потоку Φ ;
- зміною напруги живлення U .

Регулювання частоти обертання зміною опору кола якоря

Цей спосіб є найпростішим і реалізується за допомогою додаткового опору, увімкненого послідовно з обмоткою якоря.

Для цієї мети часто застосовують той самий реостат, що використовується під час пуску двигуна.

Наприклад, за допомогою реостата рис. 3.9, а, для якого на рис. 3.9, б, зображені механічні характеристики при моменті $M = M_{ем}$, можна одержати частоти обертання n_1, n_2, n_3, n_4 . У тому випадку, коли необхідно мати інші частоти обертання, реостат постачають додатковими ступінцями опорів. Якщо один і той самий реостат застосовується як для пуску, так і для регулювання швидкості, він працює в більш важких теплових умовах, ніж спеціальний регулювальний пристрій, призначений лише для одного з цих процесів.

При зміні опору в колі якоря відбувається наступне. Допустимо, що двигун паралельного (послідовного, змішаного) збудження працює на природній характеристиці з моментом $M = M_{cm}$ і частотою обертання n_c (див. рис. 3.9). В першу мить після включення в коло якоря реостата з опором $R = R_1 + R_2 + R_3$ через інерційність двигуна частота обертання не змінюється.

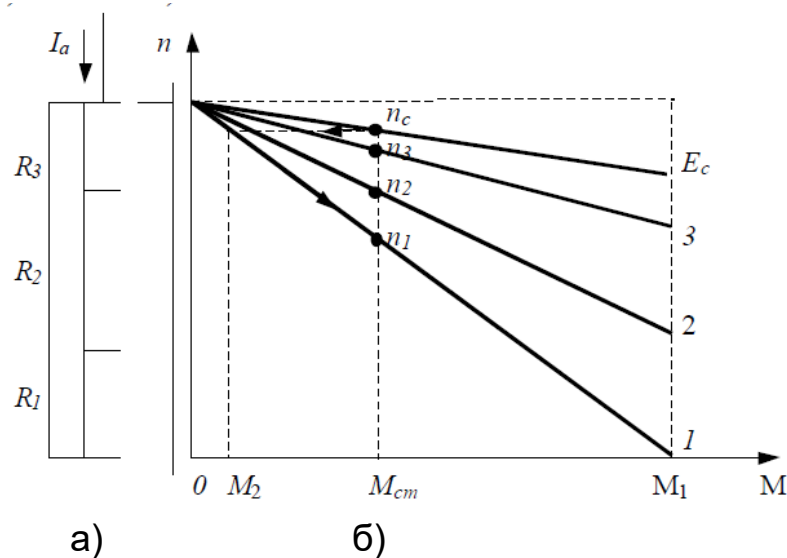


Рисунок 3.9 - Схема регулювального реостата (а) і механічні характеристики (б) двигуна паралельного збудження.

Збільшення опору при незмінній частоті обертання приводить до зменшення струму якоря, а, виходить, і моменту двигуна. При частоті обертання n_c двигун перейде на характеристику 1 і буде розвивати момент M_2 . Так як $M_2 < M_{cm}$, то почнеться перехідний процес, при якому частота обертання двигуна буде знижуватися. Це викликає зменшення ЕРС, а отже, збільшення струму якоря і моменту руху двигуна. Сталої режим настає при частоті обертання n_1 , при якій $M = M_{cm}$.

Таким чином, введення додаткового опору дозволяє отримати знижені швидкості при збереженні стійкості роботи двигуна, хоча супроводжується підвищеними втратами потужності в колі якоря.

Розглянутий спосіб регулювання частоти обертання є технічно простим, не потребує складного або дорогого обладнання й дозволяє легко отримати знижену швидкість при заданому навантаженні.

Однак метод має два суттєвих недоліки:

1. М'які механічні характеристики. Через додатковий опір у колі якоря частота обертання двигуна сильно залежить від навантаження. Це утруднює підтримання сталої швидкості, особливо при низьких частотах обертання або змінних навантаженнях.
2. Великі втрати потужності. Під час регулювання значна частина електричної енергії розсіюється у вигляді тепла в пусковому реостаті. Ці

втрати зростають зі збільшенням додаткового опору R_d і зниженням швидкості двигуна.

Отже, регулювання за рахунок зміни опору кола якоря є малоефективним з енергетичної точки зору, і його застосовують переважно у простих або допоміжних приводах, де не висуваються високі вимоги до стабільності швидкості.

Регулювання частоти обертання двигуна постійного струму зміною магнітного потоку. Для регулювання частоти обертання двигунів паралельного і змішаного збудження шляхом зміни *магнітного потоку* в коло шунтової обмотки включають реостат R_{pr} . Зміна опору останнього приводить до зміни струму I_3 і, отже, магнітного потоку.

Характер зміни частоти обертання, на рис. 3.10 приведені залежності $n = f(\Phi)$.

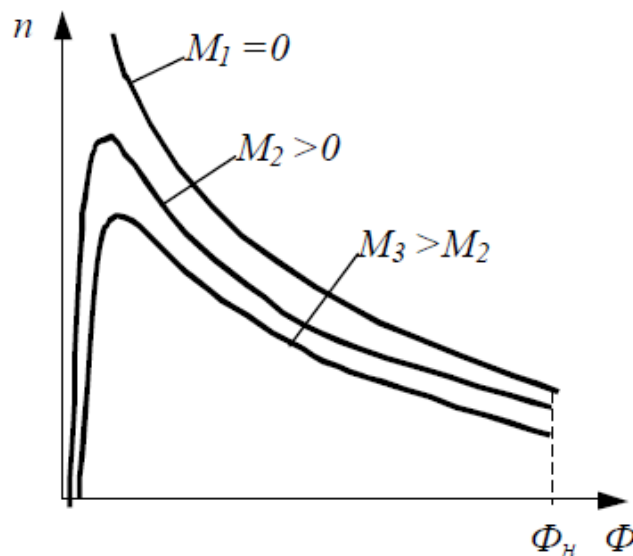


Рисунок 3.10 - Залежності $n = f(\Phi)$ двигуна паралельного збудження при різних моментах

При роботі двигуна вхолосту ($M_1 = M_{ct1} = 0$) зі зменшенням магнітного потоку частота обертання зростає і при $\Phi \rightarrow 0$ $n \rightarrow \infty$. Якщо ж двигун навантажений ($M = M_{ct} \neq 0$), то при зменшенні магнітного потоку частота обертання спочатку зростає, а потім, досягнувши максимального значення, зменшується. Та сама частота обертання у випадку ($M = M_{ct} \neq 0$) може бути отримана при двох різних значеннях магнітного потоку. Однак робочою областю, у якій виконується регулювання частоти обертання, є область, що відповідає великим магнітним потокам, де зі зменшенням потоку частота обертання зростає.

На підставі виразу $M = C_M \Phi I_a$ можна також зробити важливий висновок про те, що при $M = M_{ct} = const$ і зменшенні магнітного потоку струм I_a зросте. Це необхідно враховувати при виборі потужності двигуна.

Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при різних значеннях магнітного потоку мають пряmolінійний характер.

Менші значення Φ відповідають вищим частотам обертання, але водночас роблять характеристику м'якшою, тобто більш залежною від навантаження (рис. 3.11).

Наприклад, установивши Φ_1, Φ_2, Φ_3 , одержимо при моменті опору $M_{ст}$ частоти обертання n_1, n_2 та n_3 .

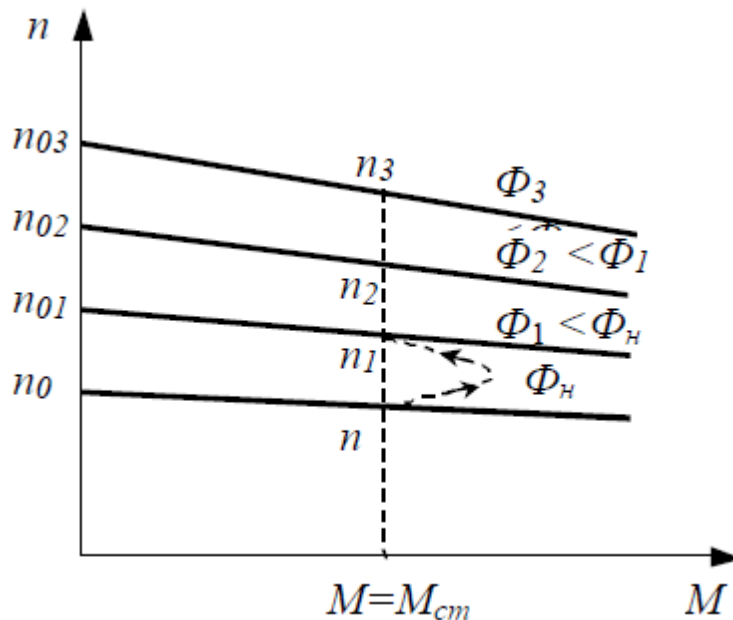


Рисунок 3.11 - Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при різних магнітних потоках

Перехід від однієї механічної характеристики до іншої під час зміни магнітного потоку не є миттєвим. Він відбувається поступово — за законом, що відповідає динамічній характеристиці, показаній на рис. 3.11 пунктирною лінією. Цей ефект пояснюється тим, що обмотка збудження має значну індуктивність, тому струм у ній не може змінюватися миттєво. Унаслідок цього зміна магнітного потоку Φ відбувається поступово, паралельно із зміною частоти обертання n .

Таким чином, реальна траєкторія зміни швидкості при регулюванні за потоком завжди має інерційний характер.

Розглянутий спосіб регулювання має суттєві переваги.

Передусім, він є економічним, оскільки додаткові втрати потужності в регульовальному реостаті обмотки збудження незначні.

Крім того, отримувані механічні характеристики залишаються досить жорсткими, що забезпечує стабільність швидкості при зміні навантаження і спрощує процес керування.

Разом із тим, метод має і важливе обмеження — регулювання швидкості шляхом зміни магнітного потоку можливе лише у напрямку підвищення швидкості, тобто вище природної механічної характеристики. Зменшити швидкість нижче номінальної цим способом неможливо, оскільки

збільшення магнітного потоку понад номінальне практично не реалізовується через насичення магнітопроводу.

Регулювання частоти обертання зміною підведеної напруги

Як зазначалося раніше, регулювання швидкості за рахунок зміни опору в колі якоря має недолік — воно призводить до м'яких механічних характеристик, через що складно забезпечити стабільну частоту обертання при різних навантаженнях.

Щоб усунути цей недолік, застосовують системи з регульованою напругою, яка подається на якір двигуна.

Такі системи дозволяють отримувати штучні механічні характеристики з підвищеною жорсткістю, тобто забезпечують майже сталу швидкість при зміні моменту навантаження.

Одним із класичних рішень є система “генератор – двигун” (Г–Д або ТП–Д), у якій якір двигуна живиться від окремого генератора постійного струму. Рис. 3.12 показує найпростішу схему такої системи, де керування швидкістю здійснюється зміною напруги, яку розвиває генератор.

У системі “генератор – двигун” (Г–Д) якір двигуна ЯД незалежного збудження з'єднаний безпосередньо з якорем генератора ЯГ того ж типу, який приводиться в обертання приводним двигуном ДП.

Обмотки збудження генератора (ОЗГ) та двигуна (ОЗД) живляться від окремого джерела постійного струму через реостат r_1 та потенціометр r_2 , що забезпечують регулювання їхніх магнітних потоків Φ_G і Φ_D .

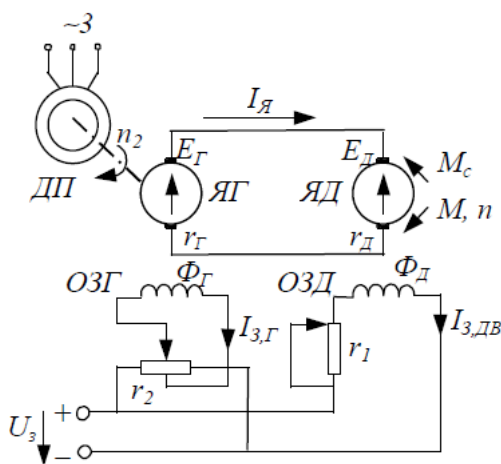


Рисунок 3.12 - Схема найпростішої системи генератор-двигун

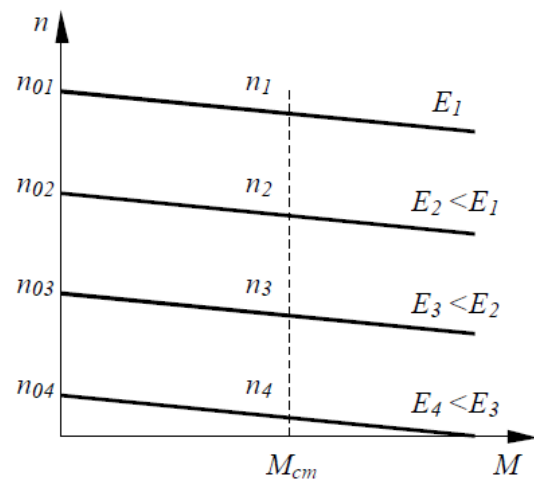


Рисунок 3.13 - Механічні характеристики двигуна в системі генератор-двигун

Перед пуском двигуна необхідно установити движки реостата r_1 і потенціометра r_2 в положення, зазначені на рис. 3.12, і зробити пуск двигуна ДП. У цей момент МРС обмотки ОЗД створює найбільший магнітний потік

Φ_D двигуна, а магнітний потік Φ_Γ , генератора і, отже, його ЕРС E_Γ дорівнюють нулю.

Очевидно, при цьому якір двигуна *ЯД* залишиться в спокої.

Щоб розпочати обертання, повзунок потенціометра r_2 переміщують, наприклад, уліво, збільшуючи струм збудження генератора $I_{з\Gamma}$. У результаті виникає потік Φ_Γ , генератор починає виробляти ЕРС E_Γ , і через якір двигуна протікає струм I_a . Взаємодія струму I_a з магнітним полем Φ_D створює електромагнітний момент, і якір двигуна починає обертатися.

Рівняння механічної характеристики $n = f(M)$ двигуна в системі Г-Д виводиться аналогічно рівнянню (23.12) має вид:

$$n = \frac{E_\Gamma}{C_{eD}\Phi_D} - \frac{M(r_\Gamma + r_D)}{C_{eD}C_{mD}\Phi_D^2} = n_0 - \Delta n.$$

Механічна характеристика $n = f(M)$ є пряма лінія. Внаслідок невеликого сумарного опору $r_\Gamma + r_D$ механічна характеристика виходить досить жорсткі.

Регулювання частоти обертання двигуна можна робити двома способами:

- зміною ЕРС генератора E_Γ при $\Phi_D = const$;
- зміною магнітного потоку Φ_D двигуна при $E_\Gamma = const$.

Другий спосіб регулювання частоти обертання був розглянутий раніше, тому зупинимося тільки на першому способі.

При зменшенні ЕРС генератора за допомогою потенціометра r_2 буде змінюватися тільки перший член рівняння, що визначає частоту обертання холостого ходу n_0 . Другий член рівняння Δn , яким визначається зміна частоти обертання, викликана навантаженням, буде залишатися незмінним. Таким чином, механічні характеристики при різних значеннях ЕРС генератора являють собою сімейство паралельних ліній (рис. 3.13) і, наприклад, при моменті M_{cm} виявляється можливим одержати частоти обертання n_1, n_2, n_3, n_4 .

Крім широкого діапазону регулювання частоти обертання система Г-Д має ряд інших достоїнств. Одне з них полягає в тому, що керування двигуном здійснюється шляхом впливу на коло обмоток збудження, потужності яких відносно невеликі.

Основним недоліком такої системи є її громіздкість, складність і висока вартість, що обмежує її застосування.

На сучасному етапі вона використовується переважно у потужних електроприводах постійного струму (понад 100 кВт), де потрібне плавне безступінчасте регулювання швидкості та висока стабільність роботи.

У сучасних електроприводах системи типу "генератор – двигун" майже повністю замінені напівпровідниковими перетворювачами постійної напруги.

Такі пристрої дозволяють живити якір двигуна постійного струму від мережі змінного струму, перетворюючи її в керовану постійну напругу.

Регулювання напруги, що подається на якір, здійснюється зміною кута відкривання тиристорів перетворювача.

- При $\alpha = 0^\circ$ напруга U має максимальне значення,
- при $\alpha = 180^\circ$ — мінімальне, майже рівне нулю.

Ця система забезпечує плавне, надійне і стійке регулювання швидкості в дуже широкому діапазоні — до 1 : 20 — при збереженні високого ККД та динамічної стійкості.

Таким чином, тиристорні та транзисторні перетворювачі стали базовим елементом сучасних електроприводів постійного струму, забезпечуючи компактність, енергоефективність і високу точність керування.

Регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження. Воно виробляється тими ж двома способами, що і двигуна паралельного збудження:

- зміною омичного спаду напруги в колі якоря;
- зміною потоку збудження.

Регулювання частоти обертання реостатом в колі якоря при $U = const$, $M_{cm} = const$. Переведемо рухливий контакт регульовального реостата з першого положення ($R_{пр} = 0$) на друге (рис. 3.14). Щоб відповісти на запитання, як змінюється струм I_a , припустимо, що сталь машини не насичена. Тоді $\Phi \equiv I_a$.

Так як $U = const$ і в перший момент після введення реостата $R_{пр}$ частота обертання двигуна n ще зберігає своє колишнє значення, то I_a зменшується відповідно до збільшення знаменника в формулі (23.16). Обертальний момент двигуна зменшується пропорційно I_a^2 , а так як $M_{cm} = const$, то частота обертання двигуна почне зменшуватися, і цей процес буде йти доти, поки струм I_a і відповідно потік Φ не досягнуть своїх колишніх значень (рис. 3.15).

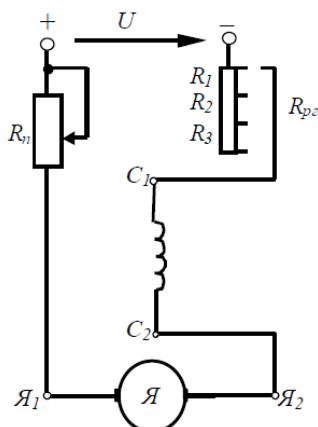


Рисунок 3.14 - Схема двигуна послідовного збудження

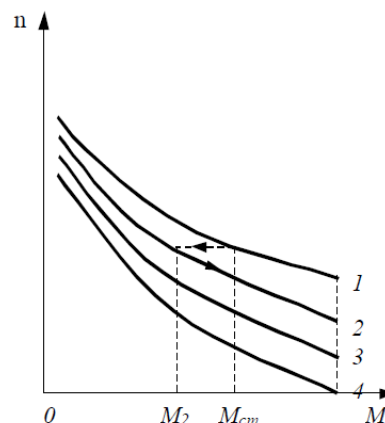


Рисунок 3.15 - Механічні характеристики двигуна послідовного збудження.

Регулювання частоти обертання двигуна постійного струму послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження. Схема регулювання приведена на рис. 3.16. Припустимо, що $U = \text{const}$ і $M_{cm} = \text{const}$. При розімкнутих рубильниках P_1, P_2 струми в якорі і в послідовній обмотці збудження рівні, тобто $I_{a1} = I_{32}$. Після замикання рубильника P_1 встановлюється новий режим роботи, при якому струм $I_{32} < I_{31}$, тому що частина струму відгалужується в опір R_{pr} . Відповідно до цього зменшується потік збудження від значення Φ_1 до значення Φ_2 . Але струм

$$I_{a2} = I_{31} + I_{pr}$$

повинний бути більше первісного I_{a1} в такій ступені, щоб збереглася рівність

$$C_M I_{a2} \Phi_2 = C_M I_{a1} \Phi_1 = M_{cm}.$$

Потужності $P_1 = UI_a$ та $P_2 = M2\pi n/60$ збільшуються, внаслідок чого віддача двигуна мало змінюється. Отже, *даний спосіб регулювання частоти обертання двигуна досить економічний*. Але умови роботи якоря у відношенні нагрівання і комутації погіршуються. Тому зі збільшенням частоти обертання n як правило не йдуть вище 25-35% від номінальної. Розглянутий спосіб регулювання широко застосовується в електричній тязі.

Регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки якоря. У порівнянні з попереднім випадком процес змінюється на зворотний, а саме, при новому сталому режимі роботи після замикання рубильника P_2 при розімкнутому рубильнику P_1 (рис. 3.16) струм $I_{a2} < I_{a1}$, тому що частина струму, що тече з мережі, відгалужується в опір R_{pr} ; I_{32} буде більше I_{31} , так, щоб збереглася рівність $C_M I_{a2} \Phi_2 = C_M I_{a1} \Phi_1 = M_{cm}$. Відповідно, потужність, що підводиться $P_1 = UI_{a2}$ збільшується, а потужність, що віддається $P_2 = M2\pi n/60$ зменшується і, отже, віддача двигуна $\eta = P_2/P_1$ сильно зменшується.

Звідси випливає, що даний спосіб регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження вкрай неекономічний. Тому він застосовується тільки там, потрібно на короткий час зменшити частоту обертання n .

На рис. 3.17 показані механічні характеристики двигунів послідовного збудження $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ для випадків:

- а) нормальної роботи двигунів (крива 1);
- б) при шунтуванні обмотки збудження (крива 2);
- в) при шунтуванні обмотки якоря (крива 3).

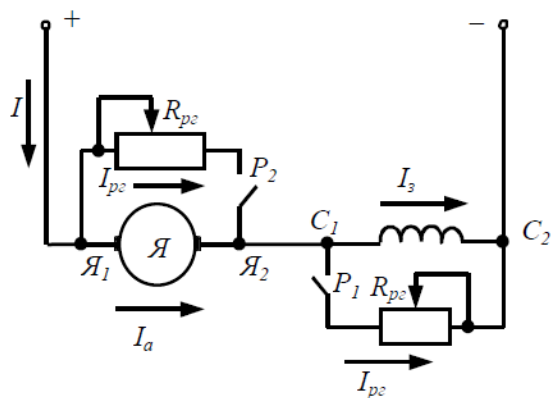


Рисунок 3.16 - Схема для регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження і якоря

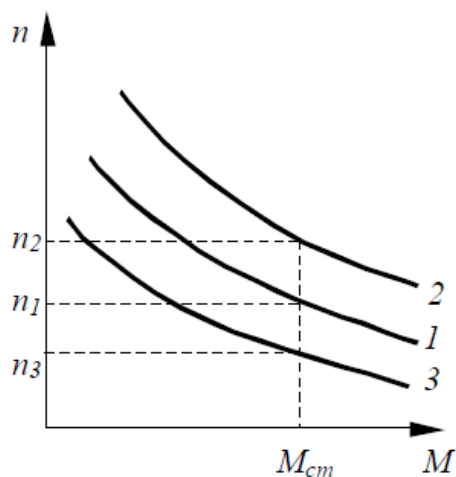


Рисунок 3.17 - Механічні характеристики двигуна послідовного збудження

Електричне гальмування двигунів постійного струму

У процесі роботи електричних приводів часто виникає потреба зменшити швидкість обертання або повністю зупинити рухомі частини механізму.

Для цього застосовують два основні типи гальмування — механічне (з використанням гальмівних пристроїв) і електричне, яке базується на використанні властивостей самої машини.

Електричне гальмування здійснюється завдяки дії електрорушійної сили (ЕРС), що індукується в обмотці якоря під час його обертання. Залежно від способу перетворення енергії під час гальмування розрізняють три основні методи:

Рекуперативне гальмування — повернення електричної енергії, отриманої при гальмуванні, назад у мережу.

Динамічне гальмування — розсіювання енергії обертання у вигляді тепла на гальмівному резисторі.

Гальмування противмиканням (реверсивне) — зміна полярності напруги на якорі, внаслідок чого створюється момент, спрямований проти обертання.

Основні схеми та характеристики кожного зі способів наведені на рисунку 3.18.

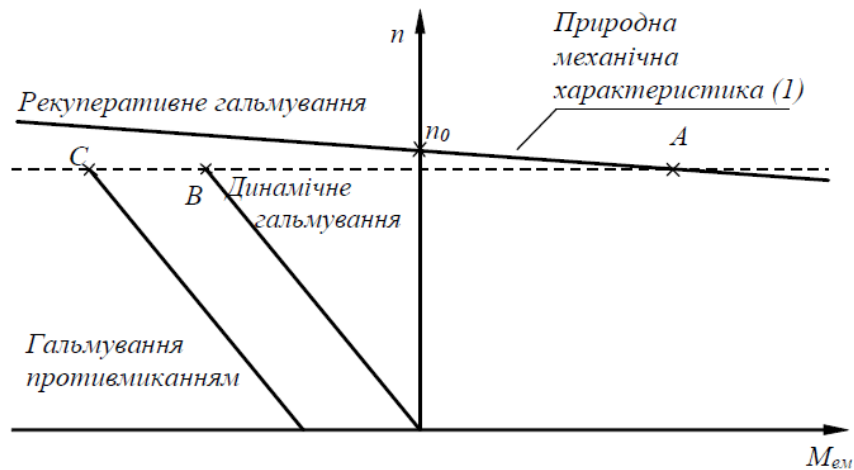


Рисунок 3.18 - Способи електричного гальмування двигунів постійного струму

Рекуперативне гальмування

Рекуперативне гальмування відбувається тоді, коли привід переходить у генераторний режим, тобто частота обертання двигуна n стає більшою за ту, яка відповідає ЕРС, рівній напрузі мережі.

Інакше кажучи, коли

$$E > U,$$

двигун починає діяти як генератор і повертає енергію назад у мережу.

У цьому випадку на валу виникає гальмівний момент, спрямований проти напрямку обертання, який визначається виразом:

$$M_g = C_M \Phi I_a$$

Рекуперативне гальмування є найекономічнішим способом, оскільки кінетична енергія обертальних частин не розсіюється, а повторно використовується в електричній мережі.

Воно можливе лише тоді, коли напруга мережі менша за ЕРС двигуна, тобто коли машина фізично здатна передавати енергію у зворотному напрямку.

Динамічне гальмування.

Динамічне гальмування реалізується шляхом відключення двигуна від мережі та підключення його обмотки якоря до гальмівного резистора $R_{\text{дод}}$.

Під час обертання ротора в якорі індукуються ЕРС, пропорційна частоті обертання. Ця ЕРС створює струм, який протікає через резистор і формує гальмівний момент, спрямований проти напрямку руху.

Величина цього якоря визначається як:

$$I_a = - \frac{E_a}{R_a + R_{\text{дод}}}.$$

З приведенного виразу очевидно, що напрямок струму в якорі зміниться на протилежний, а, отже, момент на валу машини змінить свій знак.

Якщо двигун працював спочатку в точці A , то характеристика динамічного гальмування бере свій початок від точки B , що розташована на прямій, що проходить через точку A паралельно осі абсцис. Положення точки B залежить від значення $R_{\text{дод}}$, що включається в коло якоря.

Отже, зі зменшенням швидкості двигуна гальмівний момент поступово спадає.

Для того щоб процес гальмування був стабільним і контрольованим, обмотку збудження під час динамічного гальмування необхідно живити від окремого джерела постійного струму.

Це забезпечує постійність магнітного потоку i , відповідно, прогнозовану зміну гальмівного моменту.

Гальмування противмиканням.

Гальмування противмиканням полягає у зміні полярності напруги, прикладеної до обмотки якоря.

У результаті струм у колі якоря змінює напрямок, і створюваний електромагнітний момент стає протилежним напрямку обертання ротора, діючи як гальмівний.

Щоб запобігти перевищенню допустимого струму під час цього процесу, у коло якоря вмикають додатковий опір $R_{\text{дод}}$.

Зі зменшенням швидкості обертання гальмівний момент зменшується, доки двигун повністю не зупиниться.

Після повної зупинки обертання двигун необхідно негайно відключити від мережі, інакше він почне обертатися у зворотному напрямку, переходячи у режим реверсивної роботи.

Безколекторні двигуни постійного струму

Безколекторні (електронно-комутовані) двигуни постійного струму (BLDC) за принципом роботи аналогічні класичним колекторним машинам постійного струму, однак мають принципову конструктивну відмінність — відсутність механічного колектора та щіток.

Функцію комутації струмів у фазних обмотках виконує електронний інвертор, який керується сигналами від датчиків положення ротора (оптичних, магнітних або датчиків Холла).

У таких двигунах збудження створюється постійними магнітами, закріпленими на роторі. Це забезпечує:

- високий коефіцієнт корисної дії (ККД);
- низький рівень втрат на тертя і комутацію;
- підвищену надійність і тривалий ресурс роботи;
- компактність і високу питому потужність.

Завдяки цим властивостям безколекторні двигуни широко застосовуються у системах автоматичного керування, робототехніці, аерокосмічних і авіаційних установках, а також у приладах точної механіки та портативних електронних пристроях.

Висновки.

1. Двигуни постійного струму дозволяють плавно регулювати швидкість та забезпечують високий пусковий момент, що робить їх зручними для систем автоматизованого електроприводу.
2. Тип збудження визначає характер роботи: шунтові двигуни мають жорсткі характеристики, серієсні — м'які, компаундні — проміжні.
3. Пуск здійснюється реостатним способом для обмеження струму; двигуни послідовного збудження не можна запускати без навантаження.
4. Регулювання швидкості може проводитися:
 - зміною опору якоря (просте, але неекономічне);
 - зміною магнітного потоку (економічне, але лише для підвищення швидкості);
 - зміною напруги живлення (ефективне, дає жорсткі характеристики).
5. Електричне гальмування — важливий елемент систем приводу; забезпечує плавну зупинку і рекуперацію енергії.
6. Сучасні тиристорні та транзисторні системи керування замінюють громіздкі генераторно-двигунні комплекси.
7. Безколекторні двигуни (BLDC) поєднують високу ефективність, надійність і простоту керування, що зумовлює їх широке використання в автоматизованих і мобільних системах.

Контрольні питання.

1. У чому полягає принцип дії двигуна постійного струму?
2. Яке фізичне явище обумовлює створення електромагнітного моменту на валу двигуна?
3. Як визначається напрямок противо-ЕРС у колі якоря?
4. Які типи збудження використовують у двигунах постійного струму?
5. Які основні рівняння описують роботу двигуна постійного струму?
6. Чому необхідно обмежувати пусковий струм двигуна?
7. У чому відмінність між прямим і реостатним пуском?
8. Чому двигуни послідовного збудження не можна запускати без навантаження?
9. Як змінюється швидкість двигуна при збільшенні навантаження для шунтового і серієсного типів?
10. Що таке «жорстка» та «м'яка» механічні характеристики двигунів?
11. Які способи регулювання швидкості двигуна є найбільш економічними?
12. У чому полягає суть регулювання швидкості шляхом зміни магнітного потоку?
13. Як реалізується система керування типу генератор–двигун (Г–Д)?
14. Чим замінено систему Г–Д у сучасних електроприводах?
15. Назвіть основні режими електричного гальмування та принцип їх дії.
16. У чому переваги рекуперативного гальмування?

17. Коли застосовується гальмування противмиканням?
18. Які переваги безколекторних двигунів порівняно з колекторними?
19. У яких галузях найчастіше використовуються BLDC-двигуни?
20. Як змінюється частота обертання двигуна при зміні напруги живлення?

Використана література.

1. Колотіло В. І., Донець О. В. Теорія електропривода : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка). Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 148 с.
2. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
3. Гайденко Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
4. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
5. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331с.
6. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки : навчальний посібник / Ф. П. Шкрабець та ін. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2004. 512 с.

ТЕМА 4. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРАНСФОРМАТОРИ

Значення трансформаторів для енергозабезпечення підприємств. Принцип дії та основні конструктивні елементи трансформаторів. Номінальні параметри та режими роботи. Магнітна система. Обмотки. Висновки.

Загальні відомості.

Силовий трансформатор (рис. 4.1) являє собою статичний електромагнітний пристрій, який має дві або більше обмоток і призначений для перетворення параметрів електричної енергії змінного струму за допомогою явища електромагнітної індукції.

У його обмотках здійснюється передача енергії між колами різної напруги та сили струму при незмінній частоті. Трансформатор може бути використаний не лише для перетворення рівнів напруги, але й для зміни кількості фаз, а також форми вихідної напруги, що визначається його конструктивними особливостями.

Електрична енергія, що виробляється на електростанціях, має напругу, як правило, від 6 до 30 кВ, тоді як для передавання її на значні відстані застосовуються мережі з напругою 220 – 1150 кВ.

Тому на кожній електростанції встановлюються підвищувальні трансформатори, які збільшують напругу до необхідного рівня для магістральних ліній електропередачі.

У системах розподілу електроенергії між промисловими підприємствами, міськими і сільськими споживачами застосовуються понижувальні трансформатори, які зменшують напругу до рівня 110, 220, 380 В; 6, 10, 20 або 35 кВ.

Безпосередньо біля споживачів встановлюються трансформаторні підстанції, що забезпечують живлення більшості електроприймачів, які працюють при напругах 220 В, 380 В та 660 В.



Рисунок 4.1 - Трифазний силовий трансформатор

Таким чином, електрична енергія на своєму шляху від генератора до кінцевого споживача багаторазово проходить процес трансформації, що забезпечує мінімальні втрати потужності та раціональне використання електричної енергії. На кожний кіловольт-ампер встановленої генераторної потужності припадає 7 - 8 кВА трансформаторної потужності.

Класифікація трансформаторів.

Трансформатори поділяються за різними ознаками, які визначають їх призначення, конструкцію, принцип роботи, умови експлуатації та спосіб охолодження. Така класифікація дає можливість вибрати оптимальний тип трансформатора для конкретної енергетичної або технологічної системи.

1. За призначенням

- Силові трансформатори — використовуються для перетворення напруги в системах передавання та розподілу електричної енергії. Вони є основною ланкою енергосистем, забезпечуючи узгодження рівнів напруги між електростанціями, підстанціями та споживачами.
- Вимірювальні трансформатори — призначені для зниження високих напруг і струмів до безпечних значень, необхідних для живлення вимірювальних приладів, реле захисту й систем автоматики. Поділяються на *трансформатори струму* (ТС) і *трансформатори напруги* (ТН).
- Спеціальні трансформатори — застосовуються для специфічних технологічних процесів: *зварювальні, печні, випробувальні, імпульсні, лабораторні, ізолюючі, автотрансформатори* тощо.

2. За кількістю фаз

- Однофазні трансформатори — мають одну магнітну систему та використовуються переважно в побутових мережах, допоміжних електронних пристроях і лабораторному обладнанні.
- Трифазні трансформатори — складаються з трьох однофазних систем, об'єднаних у спільний магнітопровід. Такі трансформатори найбільш поширені в промислових мережах змінного струму, оскільки забезпечують симетричне навантаження по фазах і менші втрати матеріалів.

3. За конструкцією магнітопроводу

- Стержневі — обмотки розміщені на двох або трьох стержнях магнітопроводу, а ярма з'єднують ці стержні у замкнений магнітний контур. Така конструкція має менші втрати холостого ходу й спрощене охолодження.
- Броньові — обмотки оточені ярмами магнітопроводу, що зменшує розсіювання потоку і підвищує електромагнітну стійкість. Використовуються в трансформаторах середньої та великої потужності.
- Тороїдальні — мають кільцевий магнітопровід без ярм; характеризуються високим ККД і низьким рівнем магнітного шуму, однак складні у виготовленні.

4. За способом охолодження

- Сухі трансформатори — обмотки не занурені в рідину, охолодження здійснюється природною або примусовою циркуляцією повітря. Використовуються в закритих приміщеннях, адміністративних і громадських будівлях.
- Масляні трансформатори — обмотки й магнітопровід занурені в трансформаторне масло, яке виконує функції охолодження та електричної ізоляції. Залежно від типу охолодження розрізняють:
 - природна циркуляція масла і повітря;
 - природна циркуляція масла, примусове повітряне охолодження;
 - примусова циркуляція масла і водяного теплоносія.
 - Масляні трансформатори переважають у енергетичних системах завдяки високій надійності та можливості роботи при великих потужностях.

5. За місцем установки

- Внутрішньої установки — розташовуються в спеціальних закритих приміщеннях (трансформаторних або розподільчих підстанціях).
- Зовнішньої установки — експлуатуються на відкритому повітрі, мають герметичну конструкцію, підвищений ступінь ізоляції та захист від атмосферних впливів (IP54–IP65).

6. За способом з'єднання обмоток

У трифазних трансформаторах обмотки можуть бути з'єднані за схемами зірка (Y), трикутник (Δ) або зигзаг (Z).

Взаємне розташування фаз первинної та вторинної обмоток визначає векторну групу трансформатора (наприклад, *Dyn11*, *Yyn0*), яка вказує на фазовий зсув між системами напруги. Правильний вибір векторної групи забезпечує сумісність трансформаторів у паралельній роботі.

7. За способом регулювання напруги

- Без регулювання (нерегульовані) — забезпечують фіксоване співвідношення напруг між обмотками.
- З перемикачами відпаяк без навантаження — дозволяють змінювати коефіцієнт трансформації при знеструмленому трансформаторі.
- З перемикачами під навантаженням — дають змогу регулювати напругу в робочому режимі, підтримуючи стабільність напруги в мережі.

8. За рівнем потужності та напруги

- Малі (до 10 кВА, до 1 кВ) — для місцевого живлення або електроніки;
- Середні (10–1000 кВА, до 35 кВ) — для промислових мереж;
- Великі (понад 1000 кВА, 35–750 кВ і вище) — для магістральних енергосистем.

Основні параметри трансформатора.

Кожний трансформатор обладнано табличкою номінальних даних, на якій зазначаються:

- 1) вид трансформатора - трансформатор, автотрансформатор і т.ін.;
- 2) кількість фаз мережі, до якої увімкнено трансформатор, m . На сьогодні здебільшого використовуються трифазні та однофазні трансформатори;
- 3) номінальна потужність трансформатора S_N у кіловольт-амперах (кВА) - повна потужність, на яку розраховано трансформатор за умовами нагрівання та безаварійної роботи упродовж усього строку служби;
- 4) номінальна частота f_N у герцах (Гц) - промислова частота 50 Гц, в спеціальних установках - до 400 Гц, можливо проектування трансформаторів на частоту 60 Гц;
- 5) номінальні напруги обмоток вищої напруги (ВН) та нижчої напруги (НН) U_{hN}/U_{IN} у кіловольтах (кВ). Номінальна напруга обмотки ВН визначається діючим значенням номінальної лінійної напруги на затискачах обмотки в колі з більшою напругою. Номінальна напруга обмотки НН визначається діючим значенням номінальної лінійної напруги на затискачах обмотки в колі з меншою напругою при неробочому ході. Першою завжди пишеться величина для обмотки ВН, другою - для обмотки НН. Для однофазних трансформаторів номінальні напруги визначаються фазними напругами;
- 6) номінальні струми обмоток ВН та НН I_{hN}/I_{IN} в амперах (А) - номінальні лінійні струми обмоток ВН та НН, що визначаються діючими значеннями, на які розраховано трансформатор за умовами нагрівання та безаварійної роботи упродовж усього строку служби. Першою завжди пишеться величина для обмотки ВН, другою - для обмотки НН. Для однофазних трансформаторів номінальні струми визначаються фазними струмами;
- 7) умовні позначення схем та груп з'єднання обмоток. Наприклад, для трифазних трансформаторів $Y/Y_0 - 0$, $Y/\Delta - 11$. Першою завжди пишеться схема з'єднань обмотки ВН, другою - обмотки НН. Числом від 0 до 11 позначається група з'єднань обмоток трансформатора. Для однофазних трансформаторів існує тільки одна група з'єднань - I/I-0;
- 8) напруга короткого замикання u_k у відсотках(%) - напруга на затискачах первинної обмотки при замкненні накоротко вторинній при номінальних струмах в обмотках, виражена у відсотках до номінальної первинної напруги;
- 9) умовне позначення способу системи охолодження;
- 10) повна маса у кілограмах (кг);
- 11) маса ізоляційного масла у кілограмах (кг);

Крім того, в технічних умовах на трансформатор мають бути зазначені:

втрати неробочого ходу P_0 у ватах (Вт) - втрати потужності в магнітопроводі трансформатора при номінальній напрузі первинної обмотки;
 втрати короткого замикання P_{kN} у ватах (Вт) - втрати потужності в обмотках трансформатора при номінальних струмах в обмотках;
 струм неробочого ходу i_0 у відсотках (%) - струм первинної обмотки в режимі неробочого ходу при номінальній напрузі, виражається у відсотках до номінального струму первинної обмотки;
 номінальний ККД η_N , у відносних одиницях (в.о.) або у відсотках (%) (може бути відсутнім) - ККД, визначений для номінального режиму, тобто при номінальних напругах та струмах трансформатора.

Принцип дії трансформатора

Теорія трансформаторів розглядається на прикладі найпростішого трансформатора, який являє собою однофазний двообмотковий двострижневий трансформатор (рис. 4.2).

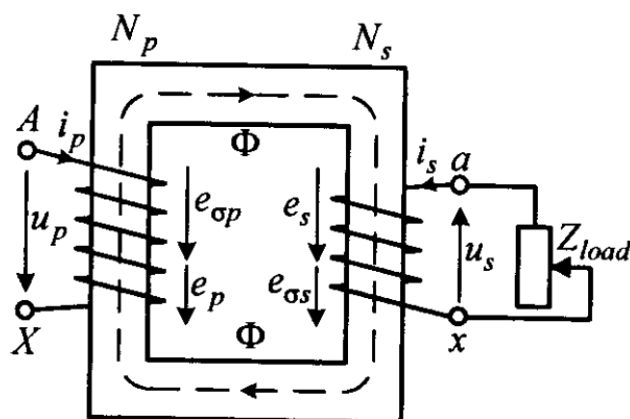


Рисунок 4.2 - Електромагнітна схема найпростішого трансформатора

Однофазний двообмотковий трансформатор складається з замкнутого феромагнітного осердя (магнітопроводу) та двох обмоток (когуюшок), розташованих на ньому та зчеплених з єдиним магнітним потоком Φ .

Використання феромагнітного замкнутого осердя істотно зменшує магнітний опір на шляху магнітного потоку та зменшує його розсіювання. Феромагнітне осердя виконується шихтованим (складеним із окремих тонких пластин). Це необхідно для зменшення магнітних втрат від змінного магнітного потоку.

Обмотка, яка приєднується до джерела змінного струму, називається первинною обмоткою. Величини, що стосуються первинної обмотки, мають індекс p (primary). Обмотка, до якої приєднується навантаження, називається вторинною обмоткою. Величини, що стосуються вторинної обмотки, мають індекс s (secondary).

Первинна обмотка AX з кількістю витків N_p приєднується до мережі змінного струму частотою f з напругою u_p . До затискувачів вторинної обмотки ax з кількістю витків N_s , приєднується навантаження з повним опором Z_{load} . У первинній обмотці протікає змінний струм i_p , що у магнітопроводі створює змінний магнітний потік Φ , напрямком якого для кожного моменту часу визначається за правилом свердлика (правого гвинта). Відповідно до закону електромагнітної індукції магнітний потік Φ індукує в обмотках ЕРС первинної та вторинної обмоток відповідно

$$e_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt};$$

$$e_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt}.$$

Якщо вторинну обмотку замкнути на опір навантаження Z_{load} , то під впливом ЕРС e_s , у колі вторинної обмотки протікатиме змінний струм i_s , а на затискачах вторинної обмотки ax установиться змінна напруга u_s . Напруга u_s , за своєю сутністю є спадом напруги на опорі Z_{load} .

Таким чином, електрична енергія з мережі передається до навантаження зі змінюванням величини напруги на опорі навантаження.

Характер змінювання струмів в обмотках, магнітного потоку, ЕРС, вторинної напруги визначається характером змінювання первинної напруги. Якщо вона змінюється за синусоїдним законом, то інші величини будуть змінюватися за тим самим законом, але з різними початковими фазами.

При синусоїдному змінюванні величин миттєвим значенням ЕРС e , напруги u та струму i відповідають їх діючі значення ЕРС E , напруги U та струму I відповідно.

Коефіцієнт трансформації

Найважливіший параметр трансформатора - це коефіцієнт трансформації, який визначається за формулою:

$$n = \frac{E_h}{E_l} = \frac{N_h}{N_l}.$$

Величини, що стосуються обмотки вищої напруги мають індекс h (high), а величини, що стосуються обмотки нижчої напруги - індекс l (low).

Для інженерних розрахунків, зважаючи на малість спаду напруги на активних та індуктивних опорах обмоток трансформатора, можна вважати, що коефіцієнт трансформації

$$n \approx \frac{E_h}{E_l} \approx \frac{U_h}{U_l}.$$

Якщо $N_p > N_s$, то $U_p > U_s$. У цьому випадку трансформатор називається знижувальним. Якщо $N_p < N_s$, то $U_p < U_s$. У цьому випадку трансформатор називається підвищувальним.

Будь-який силовий трансформатор можна застосовувати і як підвищувальний, і як знижувальний.

ККД трансформаторів становить 0,95-0,99 (більші значення відповідають трансформаторам більшої потужності), тобто втрати потужності в трансформаторах малі, і ними можна знехтувати. Тому можна вважати, що повні потужності первинної та вторинної обмоток однакові:

$$S_p = S_s, \text{ або } U_p I_p = U_s I_s.$$

Отже

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{I_p}{I_s}.$$

Для знижувального трансформатора в скільки разів зменшується напруга вторинної обмотки, у стільки ж разів підвищується струм на виході, для підвищувального трансформатора навпаки - в скільки разів збільшується напруга вторинної обмотки, у стільки ж разів знижується струм на виході.

Конструкція трансформаторів

Магнітопроводи трансформаторів будь-якого призначення та потужності завжди виконуються шихтованими з електротехнічної сталі товщиною 0,35 або 0,28 мм.

Конструкція магнітопроводів трансформатора визначається його призначенням та потужністю. За конструкцією магнітопроводу трансформатори поділяються на стрижневі; броньові; бронестрижневі; тороїдальні. Для однофазних трансформаторів малої потужності використовують стрижневі, броньові та тороїдальні магнітопроводи; середньої потужності - стрижневі; великої потужності - стрижневі та бронестрижневі.

Частина магнітопроводу, на якій розташовано обмотки, називається стрижнем. Ділянки магнітопроводу, що з'єднують між собою стрижні називаються ярмами (рис. 4.3). Проходження магнітного потоку Φ по магнітопроводу зазвичай позначається пунктирною лінією посередині поперечного перерізу елемента магнітопроводу.

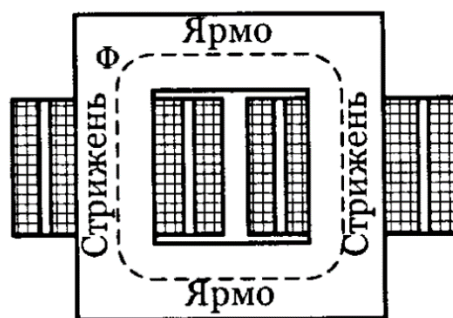


Рисунок 4.3 - Стрижневий магнітопровід однофазного трансформатора

В броньових магнітопроводах (рис. 4.4) ширина середнього стрижня виконується в 2 рази більшою за ширину бокових стрижнів. Цей тип

магнітопроводу має розгалужене ярмо, що прикриває (бронює) обмотки. Така конструкція дозволяє зменшити вдвічі величину магнітного потоку Φ , який проходить по ярмах та по бокових стрижнях

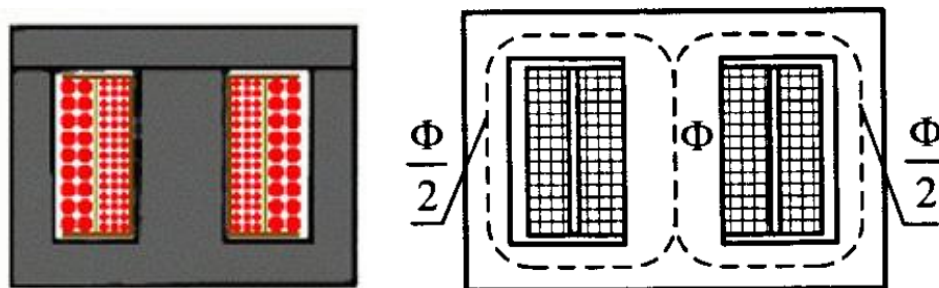


Рисунок 4.4 – Броньовий магнітопровід однофазного трансформатора

Тороїдальний магнітопровід (рис. 4.5) має форму тора. Магнітний потік Φ проходить по колу магнітопроводу. Обмотки рівномірно розташовується по всьому колу стрижня.

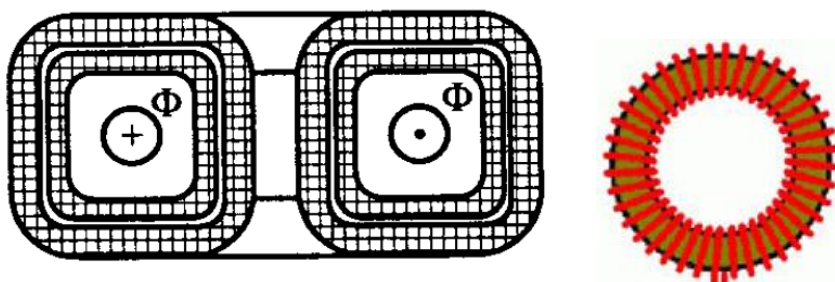


Рисунок 4.5 - Тороїдальний магнітопровід однофазного трансформатора

Бронестрижневий трансформатор (рис. 4.6) має магнітопровід із розгалуженими ярмами. Метою використання цієї конструкції є зниження габаритної висоти h_1 . Якщо трансформатор має велику потужність, то при транспортуванні залізницею висота є обмежувачим розміром (висота провісу залізничних мостів). Порівняно зі стрижневим магнітопроводом висотою h_2 , висота бронестрижневого трансформатора h_1 менша на ширину середніх стрижнів a .

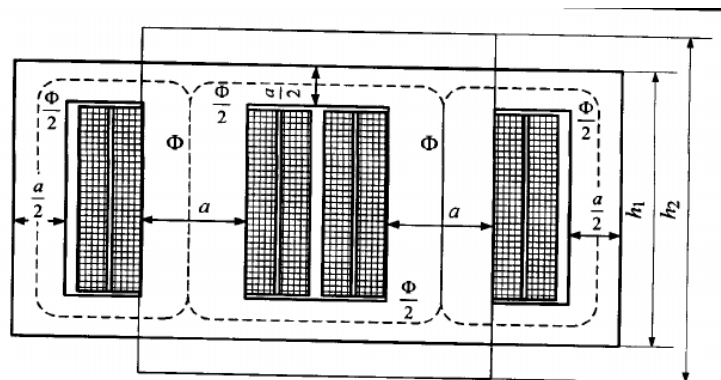


Рисунок 4.6 - Бронестрижневий магнітопровід однофазного трансформатора

Для трифазних трансформаторів малої та середньої потужності використовують плоскі тристрижневі магнітопроводи. На одному стрижні розміщуються обмотки вищої та нижчої напруг відповідних фаз. Така конструкція проста, але плоский магнітопровід магнітно несиметричний. Тому переважно застосовують просторові три стрижневі магнітопроводи.

Для трифазних трансформаторів великої потужності використовують стрижневий або плоский бронестрижневий магнітопровід (зменшення габаритної висоти).

Для дуже потужних трифазних трансформаторів магнітопроводи виконують із трьох окремих однофазних стрижневих магнітопроводів. У цьому випадку трифазний трансформатор називається трансформаторною групою.

За способом шихтування (складання магнітопроводу з окремих тонких листів) магнітопроводи поділяються на стикові та шихтовані «внапусток».

У стикових магнітопроводах (рис. 4.7) стрижні та ярма збираються окремо і з'єднуються разом за допомогою конструкційних деталей. Недоліками цієї конструкції є мала механічна міцність і неминучі технологічні повітряні зазори у стиках ярем та стрижнів. Перевагою цієї конструкції є простота посадки обмоток на стрижні. Після посадки на стрижні обмоток нижчої та вищої напруг за допомогою скоб, кожухів, шпильок стрижні та ярма збираються разом.

У магнітопроводах, що шихтовані «внапусток», розташування листів у сусідніх шарах змінюється (рис. 4.8). До переваг цієї конструкції належать висока механічна міцність та зменшення повітряних технологічних зазорів. Недоліком є необхідність розшиховування верхнього ярма для посадки обмоток на стрижні. Це є трудомісткою технологічною операцією.

Поперечні перерізи стрижнів та ярем для трансформаторів малої потужності мають форму прямокутника (рис. 4.9, а) або квадрата (рис. 4.9, б), для трансформаторів середньої та великої потужності форму східчастої фігури, що вписана у коло, (рис. 4.9 в). При східчастій формі краще використовується внутрішній об'єм обмотки: зростає площа поперечного перерізу активної сталі та з'являється можливість пропустити більший

магнітний потік. Форма поперечного перерізу ярма така сама, як і стрижнів. Однак, поперечний переріз ярма трифазних трансформаторів приблизно на 5 % більший за переріз стрижня. Це робиться для зменшення впливу магнітної несиметрії.

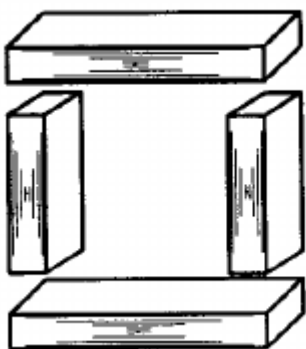


Рисунок 4.7 - Стиковий магнітоп-
ровід

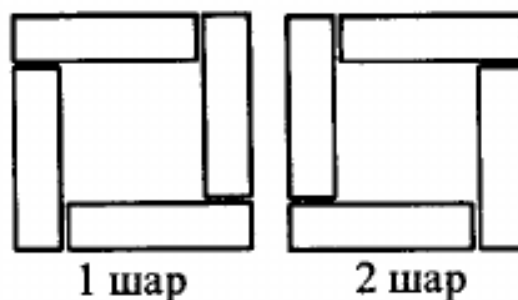


Рисунок 4.8 – Розташування листів
магнітопроводу в сусідніх шарах при
шихтуванні «внапусток»

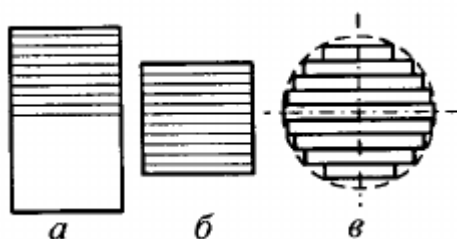


Рисунок 4.9 - Поперечні перерізи стрижнів та ярем магнітопроводів
прямокутної (а); квадратної (б) та східчастої (в) форм

Для поліпшення охолодження в магнітопроводі можуть виконуватися поздовжні та поперечні канали.

Листи пакета стрижнів скріплюються за допомогою скло бандаж, який накладається на їхню поверхню. Листи пакетів ярем скріплюються за допомогою яремних балок. Яремні балки верхнього та нижнього ярем скріплюються за допомогою шпильок за межами магнітопроводу.

Обмотки трансформаторів

Обмотки трансформаторів повинні відповідати таким технічним вимогам:

- забезпечувати необхідну електричну міцність та механічну стійкість при коротких замиканнях;
- мати мінімальні втрати потужності у провідниках;
- забезпечувати рівномірне нагрівання та ефективне охолодження;
- бути стійкими до вібрацій, дії електродинамічних і термічних навантажень.

Обмотки виготовляються переважно з міді або алюмінію:

- Мідні обмотки мають менший опір і вищу механічну міцність, що забезпечує менші втрати та компактність конструкції.
- Алюмінієві обмотки легші, дешевші, але потребують більшого перерізу провідників для тієї ж потужності.

Провідники ізолюються за допомогою емалевого покриття, просоченого паперу або склотканини. Для підвищення надійності в потужних трансформаторах застосовують транспозицію провідників (СТС-шини), що зменшує втрати від вихрових струмів.

За способом розташування обмотки вищої та нижчої напруг бувають концентричними (рис. 4.10) та переміжними (рис. 4.11).

Концентричні обмотки (рис. 4.10) виконуються у вигляді циліндрів, що одягаються на стрижень магнітопроводу один поверх одного. Ближче до стрижня розташовується обмотка нижчої напруги для більш легкого ізолювання. Ізоляційні відстані між обмоткою нижчої напруги та заземленим магнітопроводом, між обмотками нижчої та вищої напруг, між обмотками та ярмом визначаються номінальними напругами потужністю трансформатора та способом охолодження.

Переміжні обмотки (див. рис. 4.11) використовуються тільки для спеціальних трансформаторів. Обмотки нижчої та вищої напруг виконуються у вигляді окремих котушок, що по чергово насаджуються на стрижень.

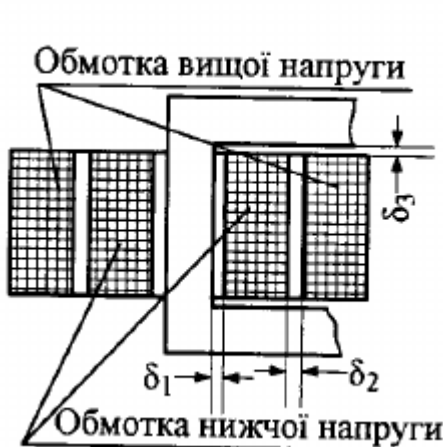


Рисунок 4.10 - Стрижень та ярма трансформатора з концентричними обмотками



Рисунок 4.11 - Стрижень та ярма трансформатора з переміжними обмотками

За способом намотування обмотки поділяються на такі типи:

циліндричні обмотки (рис. 4.12), виготовляються з ізольованого круглого або прямокутного проводу; застосовуються в однофазних і трифазних трансформаторах середньої потужності;

гвинтові обмотки (рис. 4.13), ормуються із широкої стрічки або багатожильного провідника, розташованого спіраллю; придатні для великих струмів та високих електродинамічних навантажень.

спіральні безперервні обмотки (рис. 4.14), складаються з ряду плоских дисків, з'єднаних послідовно або паралельно; відзначаються добрим

охолодженням і механічною міцністю, використовуються у потужних трансформаторах.

Ізоляція обмоток виконується з матеріалів, стійких до високої температури, електричних напруг та механічних впливів.

Типові ізоляційні матеріали:

- електрокартон, пресований папір, лакотканина, склотканина, термостійкі полімери;
- у масляних трансформаторах — просочений папір у поєднанні з трансформаторним маслом.

Для зменшення впливу електромагнітних полів між обмотками встановлюють електростатичні екрани. Додатковий захист забезпечують запобіжники, реле контролю температури й охолодження.

Системи охолодження трансформаторів

У трансформаторах використовується повітряне та масляне охолодження.

Повітряні трансформатори встановлюють в житлових і виробничих помешканнях, де знаходяться люди. Масляні трансформатори застосовуються на відкритому повітрі або в приміщеннях за відсутності людей, тому що трансформаторне масло легкозаймисте та токсичне.

У масляних трансформаторах (рис. 4.15) магнітопровід з обмотками повністю розташовується в баці, який заповнений трансформаторною оливою. Електрична міцність трансформаторного масла істотно вища за електричну міцність повітря, тому можна зменшити ізоляційні проміжки та габарити трансформатора. Теплопровідність трансформаторного масла в багато разів більша за повітря. Отже, збільшується відведення тепла від активних частин магнітопроводу, підвищується густина струму в обмотках, зменшуються габарити трансформатора та витрати активних матеріалів. Для збільшення поверхні охолодження бак виконується оребреним або облаштовується трубами та навісними охолоджувачами. На верхній кришці бака розташовуються виведення обмоток вищої та нижчої напруг, розширювальний бачок і захисна апаратура.

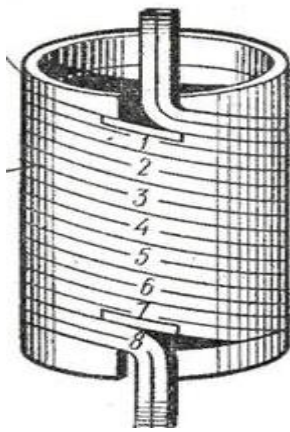


Рисунок 4.12 - Циліндрична обмотка трансформатора

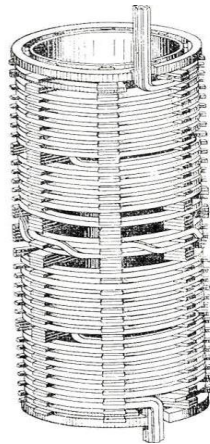


Рисунок 4.13 - Гвинтова обмотка трансформатора

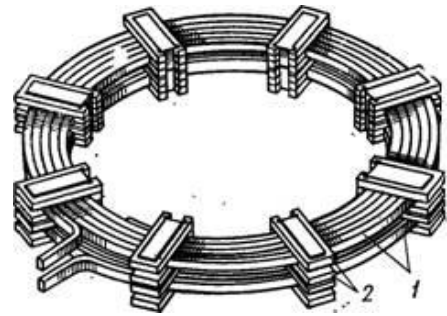


Рисунок 4.14 - Диск спіральної обмотки трансформатора



Рисунок 4.15 - Трифазний силовий трансформатор із масляним охолодженням

Висновки.

1. Трансформатор є статичним електромагнітним пристроєм, який перетворює параметри електричної енергії змінного струму — напругу та струм — при незмінній частоті, використовуючи явище електромагнітної індукції. Його основна функція полягає у забезпеченні ефективного передавання та розподілу електроенергії між різними рівнями напруги в енергосистемах.
2. Застосування трансформаторів охоплює всі етапи електропостачання — від генерації електроенергії на електростанціях до її споживання на промислових підприємствах і в побуті. Вони забезпечують підвищення напруги для дальньої передачі та її пониження для безпечного використання.

3. Класифікація трансформаторів включає поділ за призначенням (силові, вимірювальні, спеціальні), кількістю фаз (однофазні, трифазні), конструкцією магнітопроводу (стержнева, броньова, тороїдальна), способом охолодження (сухі, масляні) та іншими ознаками. Такий підхід дозволяє оптимально добирати обладнання відповідно до умов експлуатації.
4. Конструкція трансформатора складається з магнітопроводу, обмоток, системи ізоляції, бака, охолодження, вводів і перемикачів відпаек. Узгоджена робота цих елементів забезпечує надійність, довговічність і високий коефіцієнт корисної дії пристрою.
5. Магнітна система визначає ефективність і втрати холостого ходу трансформатора. Використання шихтованої електротехнічної сталі з орієнтованою текстурою та сучасних аморфних матеріалів дозволяє суттєво знизити втрати та підвищити енергоефективність.
6. Обмотки трансформатора виготовляються з мідних або алюмінієвих провідників і мають різні конструкції — циліндричну, дискову або гвинтову. Їхня якість, ізоляція й охолодження безпосередньо впливають на технічні характеристики і надійність роботи.
7. Номінальні параметри (потужність, напруга, струм, частота, коефіцієнт трансформації, ККД) та режими роботи (холостий хід, коротке замикання, номінальний режим) визначають експлуатаційні властивості трансформатора та умови його правильного використання.
8. Висока ефективність трансформаторів (ККД до 99,5 %) забезпечує мінімальні енергетичні втрати в системах передавання та розподілу електроенергії, що робить їх одним із найважливіших елементів сучасної електроенергетики.
9. Правильна експлуатація, діагностика та технічне обслуговування (контроль стану масла, температури, ізоляції, контактних з'єднань) гарантують стабільну та безпечну роботу трансформаторного обладнання протягом усього життєвого циклу.

Контрольні питання.

1. Що таке трансформатор і яке його основне призначення в енергетичних системах?
2. На якому фізичному принципі ґрунтується дія трансформатора?
3. Як визначається співвідношення напруг у первинній та вторинній обмотках трансформатора?
4. Які основні елементи конструкції трансформатора та їх функції?
5. Для чого служить магнітопровід і з яких матеріалів він виготовляється?
6. Які види втрат виникають у магнітопроводі трансформатора?
7. Які типи обмоток застосовують у силових трансформаторах і чим вони відрізняються?
8. Які матеріали використовуються для виготовлення обмоток, і як вони впливають на ККД трансформатора?
9. Що таке векторна група трансформатора і як вона позначається?

10. Які існують основні типи трансформаторів за призначенням і де вони застосовуються?
11. За якими ознаками класифікуються трансформатори?
12. Які способи охолодження застосовують у сухих і масляних трансформаторах?
13. Що таке перемикач відпаек і для чого він призначений?
14. Які основні номінальні параметри вказуються на шильді трансформатора?
15. У чому полягає режим холостого ходу та короткого замикання трансформатора?
16. Як визначається коефіцієнт корисної дії трансформатора?
17. Що таке напруга короткого замикання і який її типовий діапазон для силових трансформаторів?
18. Як впливають втрати в сталі та міді на енергетичну ефективність трансформатора?
19. Які заходи забезпечують надійну експлуатацію та довговічність трансформаторів у промислових мережах?

Використана література.

1. Гайденок Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
2. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОРМ Панов А. М., 2018. 452 с.

ТЕМА 5. РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ТРАНСФОРМАТОРА

Однофазний трансформатор. Режим холостого ходу, режим короткого замикання та робота трансформатора під навантаженням. Основні рівняння та векторні діаграми трансформатора. Нагрів та норми нагріву трансформаторів. Висновки.

Режим холостого ходу.

Холостим ходом (х.х.) трансформатора називають такий режим його роботи, коли до первинної обмотки підведена визначеної величини змінна напруга (як правило, номінальна), а вторинна обмотка розімкнута ($I_2 = 0$). Фізичні умови роботи трансформатора в цьому режимі розглянемо на прикладі однофазного двохобмоткового трансформатора (рис.5.1)

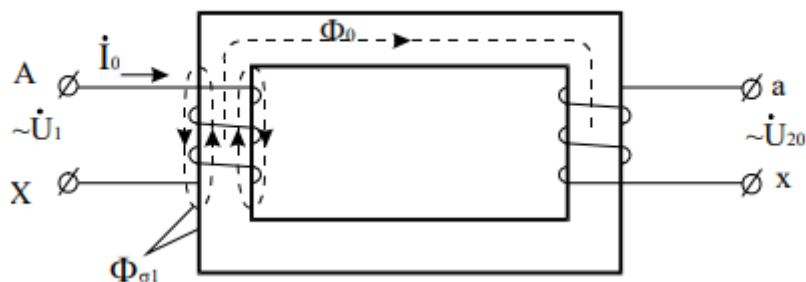


Рисунок 5.1 - Однофазний двохобмотковий трансформатор

Якщо до первинної обмотки трансформатора підвести синусоїдальну напругу U_1 , при розімкнутій вторинній обмотці, то трансформатор буде споживати з мережі струм I_0 . Під дією МРС первинної обмотки $F_1 = I_0 w_1$ в трансформаторі утвориться магнітне поле, яке представляємо потоками: Φ_0 – основний магнітний потік; $\Phi_{\sigma 1}$ – магнітний потік розсіювання первинної обмотки.

Потік Φ_0 індукує у первинній обмотці ЕРС E_1 , у вторинній обмотці – E_2 . $\Phi_{\sigma 1}$ – індукує у первинній обмотці ЕРС $E_{\sigma 1}$.

Враховуючи ЕРС, що діють в контурах первинної і вторинної обмоток, а також схему включення трансформатора при холостому ході, запишемо основні рівняння рівноваги напруг для первинної і вторинної обмоток у комплексній формі, тобто за умови, що ЕРС, струм і напруги змінюються по синусоїдальному закону

$$U = -E_1 + I_0 \dot{Z}_1;$$

$$E_2 = U_{20},$$

де U_{20} – вихідна напруга режиму холостого ходу трансформатора. Для приведеної вторинної обмотки трансформатора

$$E'_2 = U'_{20}.$$

Струм холостого ходу трансформатора I_0 , має дві складові:

I_{0a} - активна складова струму холостого ходу, що співпадає по напрямку з вектором напруги U_1 ;

$I_{0\mu}$ - реактивна (намагнічуюча) складова, ампервитки якої йдуть на створення основного магнітного потоку, співпадає по напрямку з вектором магнітного потоку Φ_0 .

Струм холостого ходу через складові

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0\mu}^2}.$$

Так як $I_{0\mu} \gg I_{0a}$, то в силових трансформаторах часто приймають

$$I_{0\mu} = I_0; \quad \frac{I_{0a}^2}{I_0^2} \leq 0,1.$$

При наявності насичення магнітних кіл трансформатора, крива зміни струму холостого ходу в часі містить крім основної також вищі гармонійні не парного порядку: 3, 5, 7, ...

Фазові співвідношення між ЕРС, струмами і напругами встановлюємо шляхом побудови векторної діаграми.

При побудові векторної діаграми враховуємо знання фізичних процесів, режиму холостого ходу (при цьому враховуємо: параметри вторинної обмотки трансформатора приведені до первинної обмотки; тільки першу гармонійну струму холостого ходу).

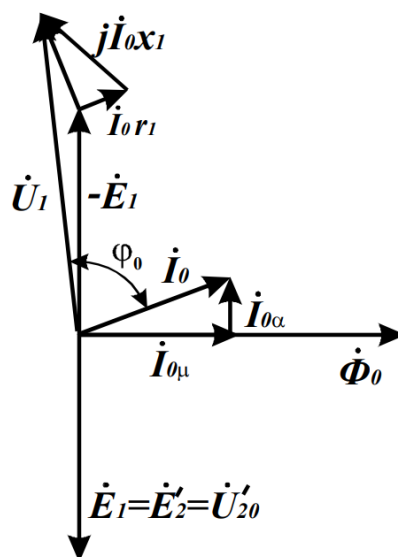


Рисунок 5.2 - Векторна діаграма трансформатора в режимі холостого ходу

При побудові векторної діаграми (рис.5.2) спочатку відкладаємо вектор основного магнітного потоку Φ_0 . Намагнічуюча складова струму холостого ходу $I_{0\mu}$ збігається по напрямку з вектором магнітного потоку Φ_0 , ЕРС E_1 і E_2 , що індукуються в первинній вторинній обмотках основним магнітним потоком, відстають від нього по фазі на кут 90° . Відповідно до рівняння рівноваги напруг для вторинної обмотки $E'_2 = U'_{20}$, тобто ЕРС дорівнює вихідній напрузі трансформатора в режимі холостого ходу. Якщо

до первинної обмотки трансформатора підведена номінальна напруга, то на виході трансформатора устновлюється також номінальна

Завершуємо побудову векторної діаграми визначенням вектора підведеної напруги $\dot{U}_1$ шляхом підсумовування векторів відповідно до рівняння напруг для кола первинної обмотки.

Таким чином, в результаті побудови векторної діаграми визначаємо фазові співвідношення між напругою, ЕРС і струмом в режимі холостого ходу трансформатора.

Схему заміщення трансформатора для режиму холостого ходу одержуємо з розглянутої вище загальної схеми заміщення з огляду на те, що в режимі холостого ходу вторинне коло обмотки трансформатора розімкнуте і струм по ній не протікає. Схема заміщення трансформатора для режиму холостого ходу буде представлена колом (рис.5.3).

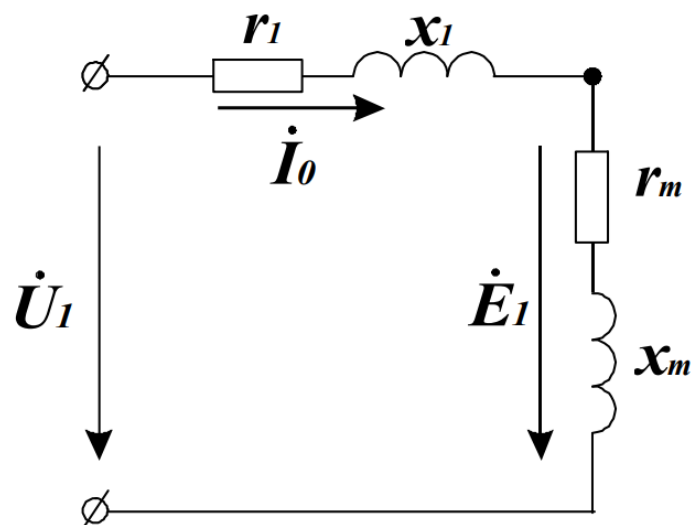


Рисунок 5.3 - Схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу

Відповідно до схеми заміщення, трансформатор в режимі холостого ходу має наступні параметри:

$r_0 = r_1 + r_m$ – активний опір трансформатора в режимі холостого ходу;

$x_0 = x_1 + x_m$ – індуктивний опір трансформатора в режимі холостого ходу.

Для силових трансформаторів справедливо, що $r_m \gg r_1$ і $x_m \gg x_1$, отже, для цих трансформаторів можна прийняти, що $r_0 \approx r_m$ і $x_0 \approx x_m$.

Дослід холостого ходу трансформатора

Випробування трансформатора в режимі холостого ходу має на меті: а) визначити параметри схеми заміщення трансформатора; б) визначити коефіцієнт трансформації трансформатора. Принципова схема дослід холостого ходу для однофазного двохобмоткового трансформатора представлена на рис.5.4.

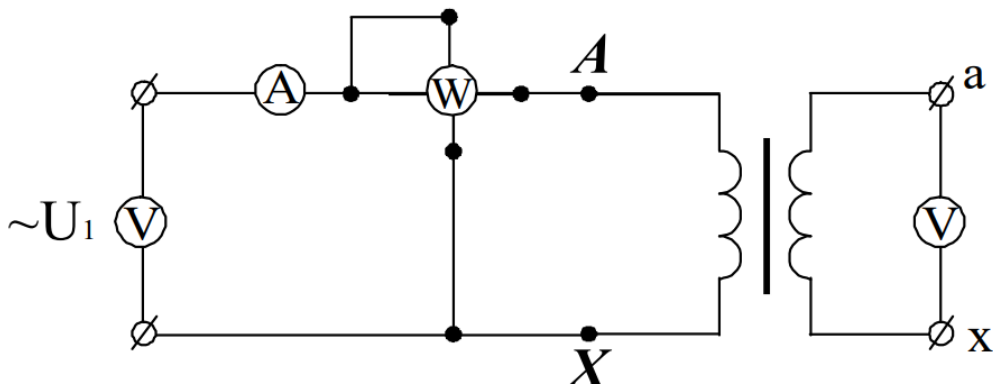


Рисунок 5.4 - Схема досвіду холостого ходу трансформатора

Вимірюють:

U_1 – підведена до трансформатора напруга;

I_0 – струм холостого ходу трансформатора;

P_0 – активна потужність, яку споживає трансформатор в режимі холостого ходу;

U_{20} – вихідна напруга трансформатора в режимі холостого ходу.

Розраховують:

а) параметри холостого ходу:

$Z_0 = U_1 / I_0$ - повний опір трансформатора в режимі холостого ходу;

$r_0 = P_0 / I_0^2$ - активний опір трансформатора в режимі холостого ходу;

$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$ - індуктивний опір трансформатора в режимі холостого ходу;

б) коефіцієнт трансформації трансформатора

$$K = E_1 / E_2 \approx U_1 / U_{20}$$

в) коефіцієнт потужності холостого ходу трансформатора

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (U_1 \cdot I_0)$$

При визначенні коефіцієнта трансформації має місце похибка, оскільки U_1 відрізняється від E_1 на величину $I_0 \cdot Z_1$

Однак ця похибка невелика, оскільки в силових трансформаторах струм холостого ходу I_0 складає $I_0 = (3 \div 8) \% I_{1н}$.

Як правило, струм холостого ходу виражають у відсотках від номінального струму первинної обмотки

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1н}} \cdot 100\%.$$

Для трифазного трансформатора за показаннями трьох амперметрів і вольтметрів визначаються середні значення лінійного струму $I_{0л}$ і лінійної напруги $U_{1л}$ а за показаннями ватметрів потужність холостого ходу трьох фаз $P_0 = P' + P''$. Фізичний зміст мають тільки значення опорів. Тому необхідно прийняти до уваги схему з'єднання обмоток. У випадку з'єднання первинних обмоток зіркою

$$z_0 = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3} I_{0л}}; r_0 = \frac{P_0}{3 I_{0л}^2}; x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2},$$

при з'єднанні їх трикутником

$$z_0 = \frac{\sqrt{3}U_{1л}}{I_{0л}}; r_0 = \frac{P_0}{I_{0л}^2}; x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Коефіцієнт потужності холостого ходу

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{(3)U_{1л} * I_{0л}}}.$$

З аналізу схеми заміщення трансформатора при $I'_2 = 0$ ви-пливає, що параметри холостого ходу z_0 , r_0 , x_0 являють собою суми наступних опорів:

$$z_0 = |Z_1 + Z_m|; r_0 = r_1 + r_m; x_0 = x_1 + x_m.$$

В силових трансформаторах опори r_1 і x_1 в десятки і сотні разів менші опорів r_m і x_m . Тому з великою точністю можна вважати, що параметри холостого ходу дорівнюють параметрам намагнічуючого кола:

$$z_0 \approx Z_m; r_0 \approx r_m; x_0 \approx x_m.$$

Так як корисна потужність при роботі трансформатора в режимі холостого ходу дорівнює нулю, то потужність на вході трансформатора в цьому режимі витрачається на магнітні втрати в магнітопроводі P_m (втрати на перемагнічування магнітопроводу і вихрові струми) і електричні втрати $I_0^2 r_1$, (втрати на нагрівання обмотки) однієї лише первинної обмотки. Однак через невелике значення струму I_0 електричними втратами $I_0^2 r_1$, можна зневажити і вважати, що вся потужність холостого ходу являє собою потужність магнітних втрат в сталі магнітопроводу. Тому магнітні втрати в трансформаторі прийнято називати втратами холостого ходу.

Ці втрати не залежать від навантаження. Вони пропорційні квадрату магнітної індукції (B^2), тому що частота в мережі постійна.

Примітка: Для трифазних трансформаторів параметри схеми заміщення визначаються для однієї фази.

Особливості режиму холостого ходу трифазних трансформаторів.

Конструкція магнітопроводу трифазних трансформаторів впливає на режим холостого ходу. В цьому зв'язку розрізняють трифазні трансформатори:

- а) зі зв'язаною магнітною системою;
- б) з незалежною магнітною, чи майже незалежною магнітною системою.

Прикладом трансформатора зі зв'язаною магнітною системою є трифазний стержневий трансформатор. Його магнітна система представлена на рис. 5.5.

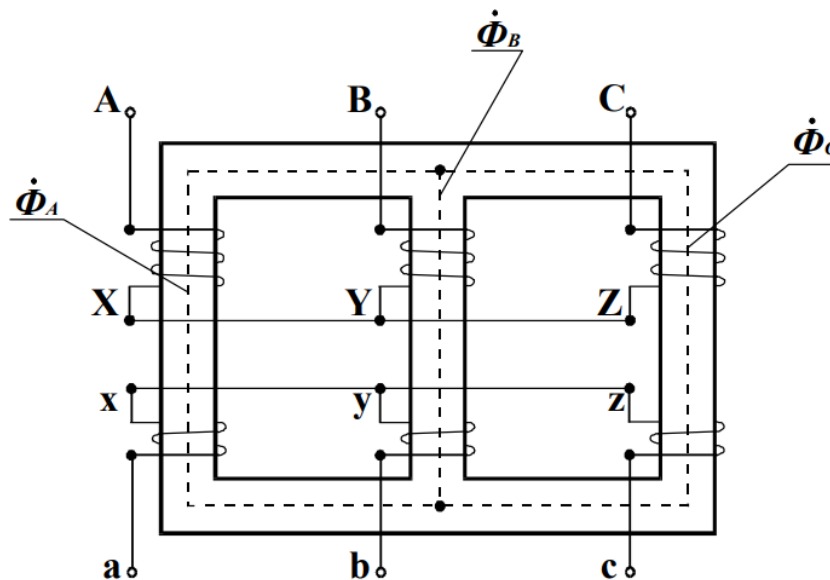


Рисунок 5.5 - Магнітна система трифазного стержневого трансформатора

Якщо до такого трансформатора підвести трифазну систему синусоїдальної напруги, то вектори фазних напруг утворять симетричну систему $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$.

Магнітні потоки кожної з фаз при цьому також утворять симетричну систему $\dot{\Phi}_A, \dot{\Phi}_B, \dot{\Phi}_C$.

Однак шлях, по якому проходять потоки кожної з фаз в трифазному стержневому трансформаторі не однаковий: для фаз A і C вони однакові і більше, ніж для фази B (див. рис. 5.5)

$$\Phi = \frac{F}{R_\mu}$$

Використовуючи закон Ома для магнітного кола приходимо до висновку, що оскільки

$$R_{\mu A} = R_{\mu C} > R_{\mu B},$$

то при однаковому значенні магнітних потоків повинна виконуватися умова

$$F_A = F_C > F_B$$

тут F - магніторушійна сила обмоток трансформатора; R_μ магнітний опір магнітопроводу.

Тому в режимі холостого ходу для трифазного стержневого трансформатора спостерігається несиметрія струмів холостого ходу

$$I_{0A} = I_{0C} > I_{0B}.$$

При переході до навантажувального режиму роботи несиметрія струмів по фазах практично не спостерігається, оскільки намагнічуючий струм складає кілька відсотків від номінального струму.

Прикладом трансформатора з незалежною магнітною системою є трифазний трансформатор, що складається з трьох однофазних трансформаторів, так звана трифазна трансформаторна група.

Принципова схема цього трансформатора представлена на рис.5.6.

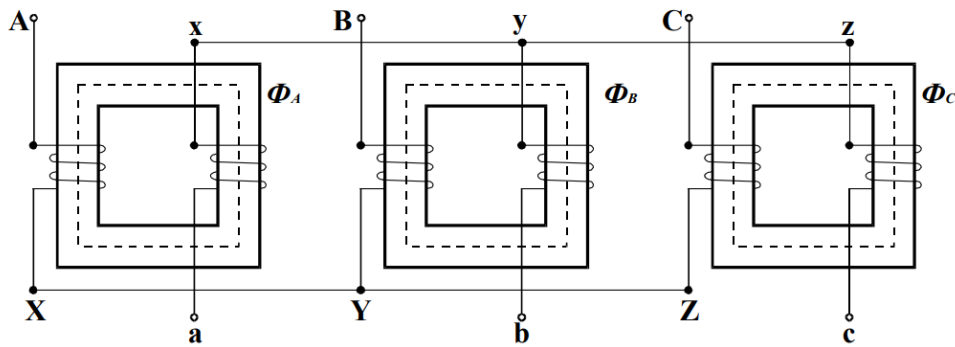


Рисунок 5.6 - Трифазна трансформаторна група.

Контури проходження магнітних потоків для кожної з фаз у такому трансформаторі однакові, тому несиметрії струмів холостого ходу не спостерігається. Прикладом трансформатора з майже незалежною магнітною системою є броньовий трансформатор. У цього трансформатора несиметрія струму холостого ходу по фазах незначна

Фізичні умови роботи трансформатора при короткому замиканні, основні співвідношення і векторна діаграма

Коротким замиканням (к.з.) трансформатора називається такий режим його роботи, коли до первинної обмотки підводиться визначеної величини перемінна напруга, а вторинна обмотка замкнута накоротко.

Розрізняють два види (режими) короткого замикання:

1. Раптове коротке замикання, яке має місце в умовах експлуатації трансформатора, тобто коли до трансформатора підводиться номінальна напруга. Це аварійний режим, оскільки за дуже короткий проміжок часу струми в обмотках можуть перевищити в десятки разів номінальні струми. При цьому порушується тепловий режим трансформатора і між обмотками діють значні динамічні зусилля. Цей режим тим небезпечніший, чим більша потужність і габарити трансформатора. Трансформатори мають максимальний струмовий захист від раптових коротких замикань.

2. Випробування трансформатора в режимі короткого замикання, тобто коли до трансформатора підводиться знижена напруга $U_{1к}$ такого значення, щоб струми в обмотках трансформатора були номінальними. Цю напругу називають номінальною напругою короткого замикання трансформатора. Її виражають у відсотках від номінального $U_{1н}$ і вказують в паспорті трансформатора

$$U_k \% = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100\%.$$

В силових трансформаторах напруга к.з. складає $(2 \dots 10)\% U_{1н}$. Розглянемо фізичні умови роботи трансформатора в режимі короткого замикання на прикладі схеми однофазного двохобмоткового трансформатора (рис.5.7), коли до первинної обмотки підведена знижена напруга $U_{1к}$.

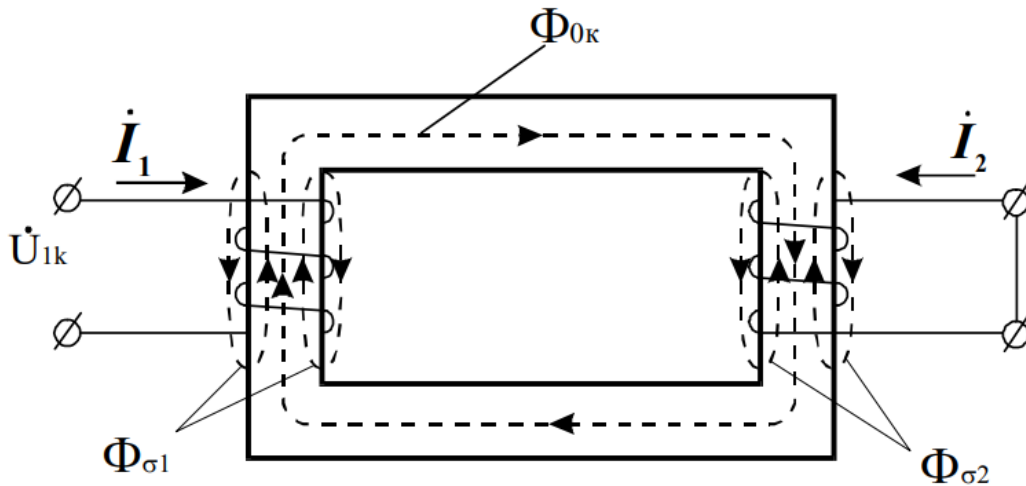


Рисунок 5.7 - Однофазний двообмотковий трансформатор

Якщо до первинної обмотки підведена змінна напруга U_{1k} , а вторинна обмотка замкнута накоротко, то по обмотках будуть протікати струми I_1 і I_2 .

Під дією МРС первинної $I_1 w_1$, і вторинної $I_2 w_2$ обмоток в трансформаторі створюється магнітне поле, яке доцільно представити у виді магнітних потоків: Φ_{0k} - основний магнітний потік при короткому замиканні; $\Phi_{\sigma 1}$ і $\Phi_{\sigma 2}$ розсіювання первинної і вторинної обмоток. потоки

Потік Φ_{0k} індукуює в первинній обмотці ЕРС E_{1k} у вторинній - E_2 .

$\Phi_{\sigma 1}$ - індукуює в первинній обмотці $E_{\sigma 1}$;

$\Phi_{\sigma 2}$ - індукуює у вторинній обмотці $E_{\sigma 2}$.

Такі фізичні умови роботи трансформатора в режимі короткого замикання.

Якщо до трансформатора підведене знижена синусоїдальна напруга, то магнітний потік Φ_{0k} незначний і насичення магнітної системи не настає, тому ЕРС і струми в трансформаторі змінюються по синусоїдальному закону.

З урахуванням схеми включення обмоток при короткому замиканні, рівноваги напруг для контурів первинної і вторинної обмоток запишуться у виді

$$\begin{aligned} U_{1k} &= -E_{1k} + I_1 Z_1; \\ E'_{2k} &= U'_2 + I_1 Z'_2, \end{aligned}$$

де $U'_2 = 0$.

Рівняння МРС для режиму короткого замикання запишемо з урахуванням наступної обставини: оскільки при номінальній підведеній напрузі, струм холостого ходу складає $(3 \div 8)\%$ від номінального струму $I_{1н}$, то при зниженій напрузі струм холостого ходу дуже малий і ним можна знехтувати. Отже в цьому випадку можна записати

$$I_1 + I'_2 = 0; \text{ або } I_1 = -I'_2.$$

Використовуючи розглянуті основні рівняння і знання фізичних процесів, установимо фазові співвідношення між ЕРС, напругами і струмами

в режимі короткого замикання шляхом побудови векторних діаграм (рис.5.8).

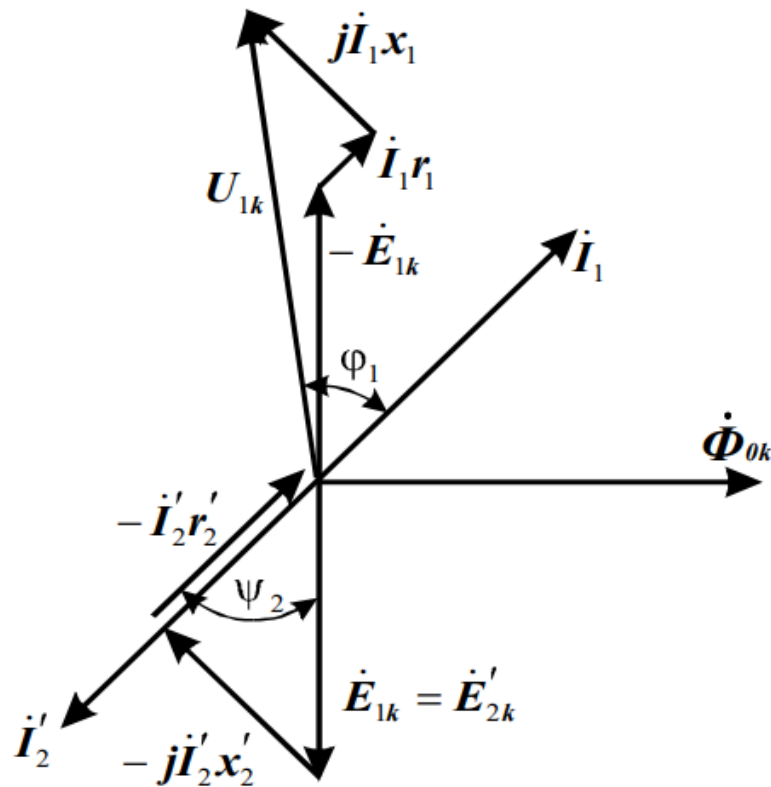


Рисунок 5.8 - Векторна діаграма трансформатора в режимі короткого замикання

Відкладаємо вектор $\dot{\Phi}_{0k}$. ЕРС $\dot{E}_{1k}$ і $\dot{E}'_{2k}$ відстають від $\dot{\Phi}_{0k}$ на кут $\pi/2$. Струм вторинної обмотки $\dot{I}'_2$, що циркулює по замкнутому контурі, зустрічає на своєму шляху опори r'_2 і x'_2 . Отже, цей струм буде відстаючим стосовно ЕРС $\dot{E}'_2$

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2}{r'_2}.$$

Згідно рівняння МРС відкладаємо вектор струму первинної обмотки рівний по величині і протилежний вектору $\dot{I}'_2$. Згідно рівняння напруг для вторинної обмотки $\dot{E}'_{2k} = \dot{I}_1 Z'_2$, підсумуємо вектори спаду напруги $\dot{I}'_2 r'_2$ і $j\dot{I}'_2 x'_2$. Завершуємо побудову векторної діаграми визначенням вектора $\dot{U}_{1k}$ для контуру первинної обмотки.

Отримана векторна діаграма режиму короткого замикання має головним чином теоретичне значення з тієї причини, що в трансформаторі дуже складно одержати роздільно значення опорів x_1 і x'_2 , тобто в досвіді короткого замикання одержують суму опорів $x_1 + x'_2 = x_k$.

Дослід короткого замикання трансформатора.

Дослідження трансформатора в режимі короткого замикання має за мету:

а) розрахувати параметри короткого замикання трансформатора;

б) розрахувати основний трикутник короткого замикання.

Схема досліду короткого замикання для однофазного двохобмоткового трансформатора представлена на рис.5.9.

До трансформатора підводиться знижена напруга такого значення, щоб струм у первинній обмотці був номінальним.

Вимірюють:

$U_{1к}$ – напруга, що підводиться;

$I_{1к}$ – струм короткого замикання;

P_k – потужність, яку споживає трансформатор при короткому замиканні.

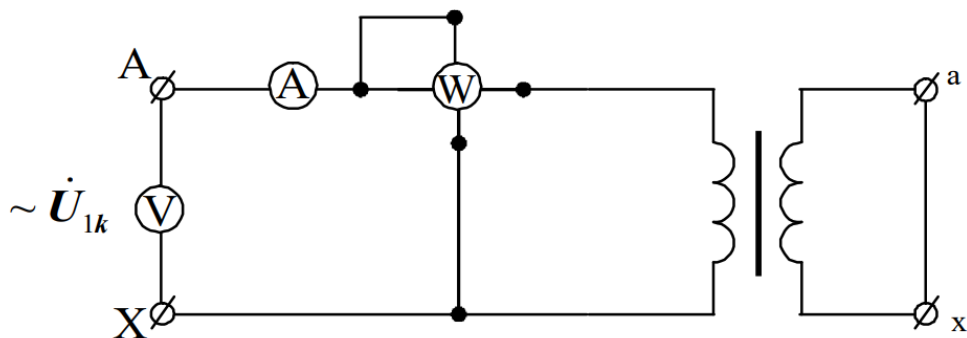


Рисунок 5.9 - Схема досліду короткого замикання трансформатора

Розраховують:

– повний опір трансформатора в режимі короткого замикання

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1н}};$$

– активний опір трансформатора в режимі короткого замикання

$$r_k = \frac{P_k}{I_{1н}^2};$$

– індуктивний опір трансформатора в режимі короткого замикання

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{1к}}{I_{1н}}\right)^2 - \left(\frac{P_k}{I_{1н}^2}\right)^2}.$$

Опір r_k приводять до температури 75° робочої температури трансформатора.

Сторони трикутника короткого замикання розраховують по залежностях:

$$U_{ка} \% = \frac{I_{1к} r_k}{U_{1н}};$$

$$U_{кр} \% = \frac{I_{1к} x_k}{U_{1н}};$$

$$U_k \% = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100\%.$$

У випадку трифазного трансформатора за показаннями приладів визначаються середні значення лінійної напруги $U_{\text{к.л.}}$, лінійного струму $I_{\text{к.л.}}$, потужно-сті короткого замикання трьох фаз $P_{\text{к}}$. При з'єднанні первинної обмотки зіркою параметри короткого замикання на фазу будуть наступні:

$$z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{к.л.}}}{\sqrt{3}I_{\text{к.л.}}}; r_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{3I_{\text{к.л.}}^2}; x_{\text{к}} = \sqrt{z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2},$$

а при з'єднанні первинної обмотки трикутником:

$$z_{\text{к}} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{к.л.}}}{I_{\text{к.л.}}}; r_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{\text{к.л.}}^2}; x_{\text{к}} = \sqrt{z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2}.$$

Коефіцієнт потужності при короткому замиканні визначається аналогічно

$$\cos\varphi_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{\sqrt{(3)}U_{\text{к.л.}} * I_{\text{к.л.}}}.$$

Відповідно до схеми заміщення приведенного трансформатора опір короткого замикання

$$Z_{\text{к}} = Z_1 + \frac{Z_m * Z_2'}{Z_m + Z_2'}.$$

Так як Z_m у сотні разів більше Z_2' то в знаменнику (2.28) можна знехтувати Z_2' у порівнянні з Z_m . Тому з великою точністю можна записати:

$$Z_{\text{к}} = Z_1 + Z_2'; r_{\text{к}} = r_1 + r_2'; x_{\text{к}} = x_1 + x_2'.$$

Ці співвідношення відповідають спрощеній схемі заміщення при замкнутих накоротко вторинних затисках ($U_2' = 0$)

Тому що x і $x_{\text{к}}$ визначаються потоками, що замикаються по повітрю, то їх значення, а також значення $z_{\text{к}}$, не залежить від $U_{\text{к}}$ і $I_{\text{к}}$.

Величина ЕРС $E_{1\text{к}}$ у досліді короткого замикання при $I_{\text{к}} = I_{\text{н}}$ в 15-30 разів менша $U_{1\text{н}}$. При цьому магнітні втрати в 225-900 разів менші, ніж у випадку $U_1 = U_{1\text{н}}$ і дуже малі. Тому потужність короткого замикання $P_{\text{к}}$ з великою точністю представляють собою потужність електричних втрат в обмотках, включаючи додаткові втрати в стінках бака і кріпильних деталях від потоків розсіювання трансформатора.

Висновки.

1. Робочий процес трансформатора визначається взаємодією магнітного поля, створеного первинною обмоткою, та ЕРС, індукованих у вторинній обмотці. Основою роботи є закон електромагнітної індукції, що забезпечує передачу енергії між обмотками без механічного зв'язку.
2. Режим холостого ходу характеризується підведенням номінальної напруги до первинної обмотки при розімкнутій вторинній. Струм холостого ходу складає лише 3–8 % від номінального і має дві складові — активну та реактивну (намагнічувальну). Потужність холостого ходу витрачається переважно на магнітні втрати в сталі.

3. Векторна діаграма холостого ходу показує фазові співвідношення між напругою, струмом і ЕРС, що дозволяє визначити активну та реактивну складові струму, а також кут зсуву фаз між ними.
4. Дослід холостого ходу застосовують для визначення параметрів намагнічувального кола трансформатора (активного та індуктивного опорів), коефіцієнта трансформації та коефіцієнта потужності холостого ходу.
5. Режим короткого замикання реалізується при зниженій підведеній напрузі, за якої струми в обмотках досягають номінальних значень. Цей режим дозволяє визначити параметри розсіювання — активний та індуктивний опори обмоток, а також коефіцієнт потужності при короткому замиканні.
6. Векторна діаграма короткого замикання демонструє, що основний магнітний потік у цьому режимі малий, насичення сталі не відбувається, а потужність короткого замикання дорівнює електричним втратам у міді обмоток.
7. Дослід короткого замикання дає змогу визначити сумарний опір трансформатора, активну та реактивну складові напруги короткого замикання, а також побудувати трикутник короткого замикання, що використовується для оцінки втрат потужності та нагріву.
8. Для трифазних трансформаторів особливості режиму холостого ходу визначаються типом магнітної системи. У стержневих трансформаторів спостерігається несиметрія струмів холостого ходу, тоді як у броньових та групових (з трьох однофазних) — майже повна симетрія.
9. Втрати холостого ходу залежать від магнітної індукції в сталі, а втрати короткого замикання — від активних опорів обмоток. Обидва види втрат визначають загальний ККД трансформатора.
10. Результати дослідів холостого ходу і короткого замикання дозволяють експериментально визначити всі параметри еквівалентної схеми трансформатора, що необхідні для аналізу його роботи в будь-якому навантажувальному режимі.

Контрольні питання.

1. Що таке робочий процес трансформатора і який фізичний принцип лежить в його основі?
2. Як визначається режим холостого ходу трансформатора?
3. Які основні параметри вимірюються під час дослідів холостого ходу?
4. Які складові має струм холостого ходу і який їхній фізичний зміст?
5. Як визначається коефіцієнт трансформації трансформатора?
6. Для чого використовується векторна діаграма режиму холостого ходу?
7. Які параметри схеми заміщення можна визначити з дослідів холостого ходу?
8. Що таке втрати холостого ходу і від чого вони залежать?

9. У чому полягає особливість режиму холостого ходу трифазного трансформатора?
10. Як впливає конструкція магнітопроводу на симетрію струмів холостого ходу?
11. Що називають режимом короткого замикання трансформатора?
12. Яка різниця між раптовим коротким замиканням і дослідним коротким замиканням?
13. Яке призначення має дослід короткого замикання?
14. Як визначається номінальна напруга короткого замикання?
15. Які параметри трансформатора визначаються під час дослід короткого замикання?
16. Що таке активний, індуктивний та повний опір короткого замикання?
17. Як побудувати векторну діаграму для режиму короткого замикання?
18. Як розраховується коефіцієнт потужності при короткому замиканні?
19. Що являє собою трикутник короткого замикання і які його сторони характеризують?
20. Який характер втрат енергії в режимах холостого ходу та короткого замикання?
21. Як впливають параметри холостого ходу та короткого замикання на ККД трансформатора?
22. Які параметри вважаються основними для еквівалентної схеми трансформатора?
23. Як проводиться дослід короткого замикання для трифазного трансформатора?
24. Яке практичне значення мають результати дослідів холостого ходу і короткого замикання?
25. Чому в режимі короткого замикання не відбувається насичення магнітопроводу?

Використана література.

1. Гайденок Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
2. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
3. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331 с.

ТЕМА 6. ПАРАМЕТРИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Зведений трансформатор. Схеми заміщення трансформатора та їх параметри. Зміна напруги, коефіцієнт корисно дії (ККД) та зовнішня характеристика трансформатора. Регулювання напруги трансформатора. Висновки.

Холостий хід і коротке замикання є граничними режимами роботи трансформатора:

при х.х. $Z_H = 8$; при к.з. $Z_H = 0$

У навантажувальному режимі роботи трансформатора

$$0 < Z_H < 8.$$

У загальному випадку навантаження трансформатора може бути:

$Z_H = R_H$ – активне;

$Z_H = X_{LH}$ індуктивне;

$Z_H = X_{CH}$ – емнісне;

змішане

$$Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_{LH}^2}$$

$$Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_{CH}^2}$$

Фізичні умови роботи трансформатора під навантаженням, розглянемо на прикладі однофазного двохобмоткового трансформатора принциповою схемою (рис. 6.1).

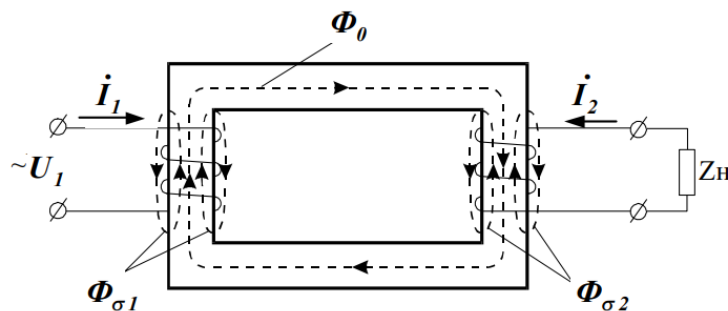


Рисунок 6.1 - Однофазний двохобмотковий трансформатор

Приймаємо умову, що до первинної обмотки підведена синусоїдальна напруга $\dot{U}_1$. Якщо вторинна обмотка трансформатора замкнута на деякий опір навантаження Z_H , то по первинній і вторинній обмотках будуть протікати струми $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_2$. Під дією МРС первинної $I_1 w_1$, і вторинної $I_2 w_2$ обмоток в трансформаторі утвориться магнітне поле, що, як відзначалося, представляється потоками $\Phi_0, \Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$.

Потік Φ_0 індукуює в первинній обмотці ЕРС E_1 , і у вторинній обмотці E_2 .

Потік $\Phi_{\sigma 1}$, індукує в первинній обмотці ЕРС $E_{\sigma 1}$.

Потік $\Phi_{\sigma 2}$ індукує у вторинній обмотці ЕРС $E_{\sigma 2}$.

Оскільки до трансформатора підведена синусоїдальна напруга, то ЕРС напруги і струми також змінюються по синусоїдальному закону. Тому основні рівняння цього режиму доцільно записати в комплексній формі.

Рівняння напруг для приведенного трансформатора

$$\dot{U}_1 = \dot{E}'_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2.$$

Рівняння МРС

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0.$$

Рівняння справедливі не тільки для однофазного трансформатора, але також для кожної фази трифазного трансформатора при симетричному навантаженні.

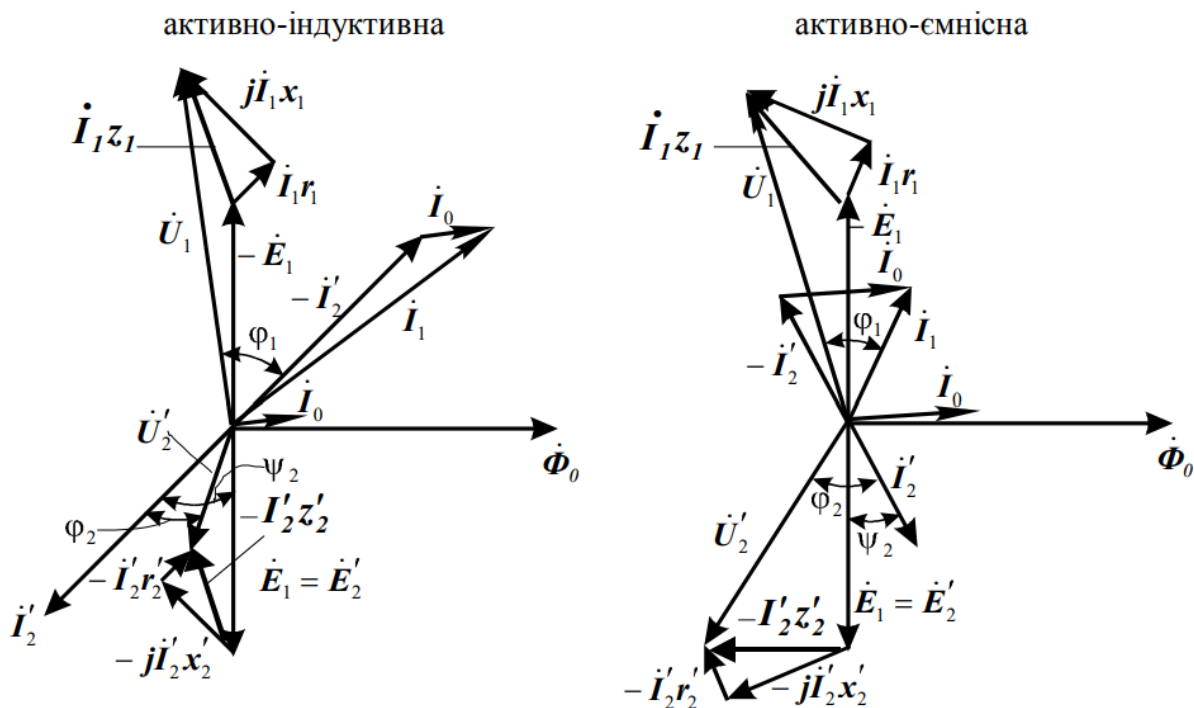


Рисунок 6.2 - Векторні діаграми трансформатора при різних навантаженнях

Векторні діаграми мають теоретичне значення, оскільки вони цілком враховують усі фактори від яких залежать фазові співвідношення між ЕРС, напругами і струмами.

Схема заміщення.

При практичних розрахунках навантажувальних режимів роботи силових трансформаторів як правило, нехтують намагнічуючим струмом, оскільки він складає $(3 \div 8)\%$ від номінального струму $I_{1н}$. У цьому випадку

основні рівняння трансформатора для навантажувального режиму роботи приймають наступний вид :

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{E}'_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{I}_1 &= -\dot{I}'_2.\end{aligned}$$

Допускаючи, що $\dot{E}'_1 = \dot{E}'_2$, виконаємо наступні перетворення

$$\dot{U}_1 = -\dot{I}'_2 Z'_2 - \dot{U}'_2 + \dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}'_1 Z'_2 - \dot{U}'_2 + \dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}'_1 (Z_1 + Z'_2) - \dot{U}'_2 = \dot{I}'_1 Z_K - \dot{U}'_2.$$

Первинна напруга $\dot{U}_1$, відрізняється від вторинної напруги $-\dot{U}'_2$ на величину спаду напруги $\dot{I}'_1 Z_K$, що являє собою трикутник короткого замикання трансформатора. При прийнятому допущенні схема заміщення трансформатора в навантажувальному режимі представлена на рис.6.3.

Приведена схема заміщення (рис. 6.3) справедлива для однофазного двохобмоткового трансформатора. Однак вона також справедлива для кожної фази трифазного трансформатора при симетричному навантаженні.

Відповідно до зроблених перетворень основних рівнянь, векторна діаграма навантажувального режиму роботи представлена на рис. 6.4 (при побудові векторної діаграми вважаємо заданими $\dot{U}_1$, $\dot{I}_1$, φ_1).

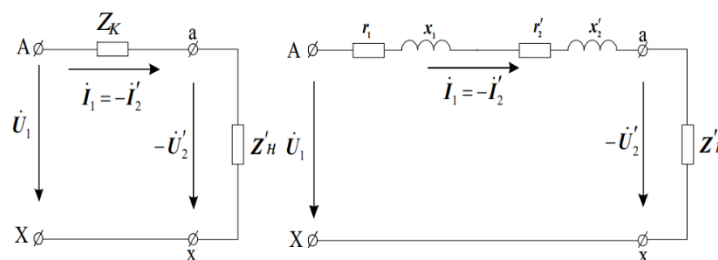


Рисунок 6.3 - Спрощені схеми заміщення трансформатора, що працює під навантаженням.

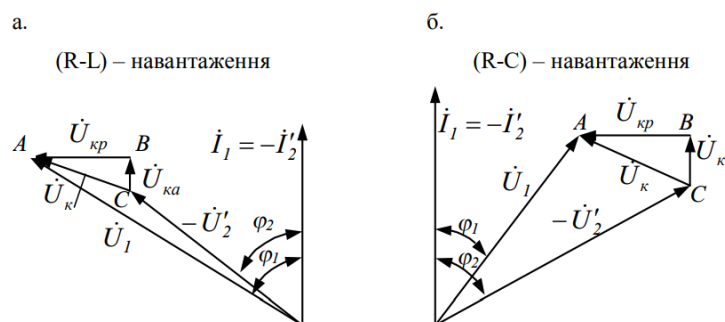


Рисунок 6.4 - Спрощені векторні діаграми трансформатора при змішаному навантаженнях

Приведені векторні діаграми називають спрощеними векторними діаграмами трансформатора, що працює під навантаженням. В результаті побудови діаграми знаходимо вектор вихідної напруги ($-\dot{U}'_2$).

Вихідна напруга трансформатора змінюється, якщо при незмінному струмі, змінився характер навантаження. Тобто спочатку було (R-L) навантаження, а потім (R-C).

Цей аналіз зручно зробити шляхом побудови поєднаної векторної діаграми для (R-L) і (R-C) навантажень.

Як впливає з приведеної векторної діаграми (рис. 6.5), при переході від (R-L) - навантаження до (R-C) - навантаження при незмінному значенні струму в обмотках, вихідна напруга трансформатора збільшується.

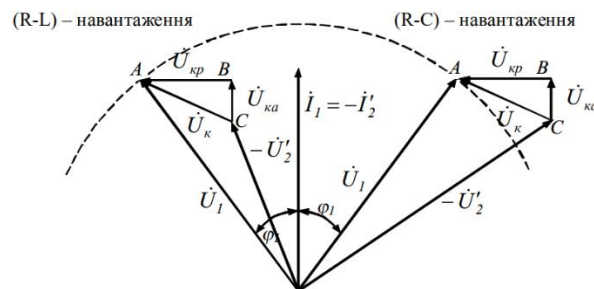


Рисунок 6.5 - Поєднана векторна діаграма для активно-індуктивного і активно-ємнісного навантаження.

Зміна вихідної напруги трансформатора.

Більш характерним є випадок, коли характер навантаження не змінюється, тобто $\cos \varphi_2 = \text{const}$, а змінюється величина навантаження, тобто струм вторинної обмотки трансформатора I_2 . З рівняння напруг для вторинного контуру, яке представляємо у виді $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$, впливає, що при зміні навантаження при $E_2 = \text{const}$, вихідна напруга $\dot{U}_2$, змінюється, так як змінюється спад напруги $\dot{I}_2 Z_2$.

Залежність вихідної напруги трансформатора U_2 , від струму навантаження I_2 при $\cos \varphi_2 = \text{const}$ називається зовнішньою характеристикою трансформатора

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } \cos \varphi_2 = \text{const}.$$

Якщо розглянути ряд значень коефіцієнта потужності $\cos \varphi_2$, то можна одержати сімейство зовнішніх характеристик $U_2 = f(I_2)$ (рис.6.6).

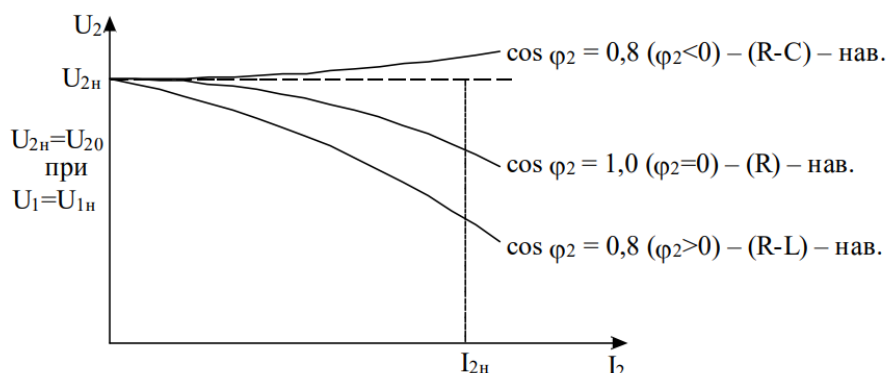


Рисунок 6.6 - Зовнішні характеристики трансформатора при різному характері навантаженнях.

При збільшенні активного чи активно-індуктивного навантаження, вихідна напруга трансформатора зменшується, оскільки збільшується спад напруги.

При збільшенні активно-ємнісного навантаження вихідна напруга трансформатора трохи збільшується, що має місце при випереджальному струмі.

Відповідно до зовнішніх характеристик, зміна навантаження трансформатора приводить до зміни вихідної напруги.

Під зміною вихідної напруги трансформатора розуміють виражене у відсотках від номінальної напруги зміна напруги на вторинній обмотці при переході від режиму холостого ходу до режиму номінального навантаження, що характеризується номінальним значенням струму, тобто $I_2 = I_{2H}$.

Цю зміну напруги легко розрахувати, якщо відома відповідна зовнішня характеристика трансформатора.

$$\Delta U \% = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}} \cdot 100 \% .$$

При проектуванні трансформатора, виникає необхідність у визначенні $\Delta U\%$, однак необхідна зовнішня характеристика відсутня. В цих випадках $\Delta U\%$ оцінюють по розрахунковій залежності

$$\Delta U\% = U_{\kappa\alpha} \cos\varphi_2 + U_{\kappa\rho} \sin\varphi_2.$$

Ця залежність визначає зміну вихідної напруги трансформатора при номінальному навантаженні.

Якщо навантаження відрізняється від номінального, то її можна характеризувати коефіцієнтом навантаження

$$\kappa_{HB} = \frac{S_2}{S_H},$$

де S_2 - розрахункова потужність трансформатора; S_H — номінальна потужність трансформатора.

Тоді

$$\Delta U\% = \kappa_{HB} (U_{\kappa\alpha} \% \cos\varphi_2 + U_{\kappa\rho} \% \sin\varphi_2).$$

Залежність $\Delta U\% = f(\kappa_{HB})$ при $\cos\varphi_2 = \text{const}$ також являє собою зовнішню характеристику трансформатора (рис. 6.6).

Втрати і коефіцієнт корисної дії трансформатора

В процесі перетворення підведеної до трансформатора потужності P_1 , в потужність P_2 , що корисно віддається, у трансформаторі мають місце втрати потужності.

Втрати в трансформаторі залежать від його режиму роботи. Характеристика цих втрат в режимах холостого ходу., короткого замикання і навантажувальному режимі.

В режимі холостого ходу вторинна обмотка трансформатора розімкнута. Трансформатор споживає з мережі активну потужність P_0 , що представляє суму наступних втрат:

- електричні втрати в первинній обмотці трансформатора від струму холостого ходу;
- магнітні втрати в сталі магнітопроводу і в конструктивних деталях трансформатора.

З огляду на те, що в силових трансформаторах струм холостого ходу складає $I_0 = (3 \div 8)\% I_{1H}$, електричні втрати в первинній обмотці трансформатора малі, тому ними, як правило, нехтують. Вважають, що потужність, яка споживається з мережі P_0 в цьому режимі витрачається тільки на покриття магнітних втрат P_m .

Ці втрати поділяють на:

- основні (О);
- додаткові (Д).

Основні магнітні втрати $P_{m.o}$ являють собою втрати на гістерезис і вихрові струми в сталі магнітопроводу трансформатора.

Додаткові магнітні втрати це втрати в конструктивних деталях трансформатора: баці, ярмових балках і т.д., а також втрати в місцях стиків між стержнями і ярмом. Ці втрати не піддаються точному обліку, тому для силових трансформаторів вважають, що вони складають $(15 \div 20)\%$ від $P_{m.o}$.

Для режиму холостого ходу трансформатора можна записати

$$P_0 = (1,15 \div 1,2)P_{m.o}$$

В режимі короткого замикання трансформатора вторинна обмотка замкнута накоротко, а до первинної обмотки підводиться знижена напруга.

Оскільки основний магнітний потік, що проходить по магнітопроводу трансформатора в цьому режимі малий, то магнітними втратами можна знехтувати. Тому в режимі короткого замикання враховуються тільки електричні втрати, тобто втрати в первинній і вторинній обмотках трансформатора.

Ці втрати також поділяють на:

- основні (О);
- додаткові (Д).

Основні електричні втрати в обмотках відповідають активним опорам r_{10} і r_{20} обмоток постійному струму.

Тому можна записати

$$P_{e0} = I_1^2 r_{10} + I_2^2 r_{20}.$$

Додаткові втрати в обмотках трансформатора це втрати у відводах, а також втрати в провідниках обмоток від вихрових струмів. Ці втрати також не піддаються точному обліку. Тому їх враховують збільшенням активного опору обмоток до значень

$$r_1 = r_{10} k_{d1}; r_2 = r_{20} k_{d2}$$

де $k_{д1}$ і $k_{д2}$ коефіцієнти додаткових втрат в обмотках трансформатора.

Для силових трансформаторів існують таблиці цих коефіцієнтів.

Електричні втрати в обмотках трансформатора (за умови, що знехтуємо струмом I_0) можна виразити залежністю

$$P_e = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_1 + (I_2')^2 r_2' = I_1^2 (r_1 + r_2') = I_1^2 r_k.$$

Таким чином, оскільки потужність, що споживається трансформатором в режимі короткого замикання P_k , витрачається на електричні втрати в обмотках, то можна записати

$$P_e = P_k = I_{1н}^2 r_k.$$

тому що при к.з. $I_1 = I_{1н}$

В навантажувальному режимі вторинна обмотка трансформатора замкнута на деякий опір навантаження. При цьому втрати потужності в трансформаторі складаються з електричних і магнітних втрат. Ці втрати залежать від значення навантаження трансформатора.

Магнітні втрати пропорційні квадрату індукції в магнітопроводі трансформатора. Отже можна вважати, що вони пропорційні E_1^2 . З рівняння напруг для первинної обмотки трансформатора $\dot{U}_1$, видно, що ЕРС $\dot{E}_1$, відрізняється від підведеної напруги $\dot{U}_1$, на величину $\dot{I}_1 Z_{1\sigma}$. В номінальному режимі роботи трансформатора ця величина на порядок нижче підведеної напруги $\dot{U}_1$. Тому з достатнім ступенем точності можна вважати, що при зміні навантаження трансформатора

$$E_1 \approx U_1 = const.$$

Таким чином, магнітні втрати в трансформаторі можна вважати незалежними від значення навантаження. Тому їх називають постійними втратами трансформатора. Магнітні втрати трансформатора в режимі навантаження можна виразити як

$$P_0 = (1,15 \div 1,2) P_{м.0} = P_0 = const.$$

Значення потужності холостого ходу P_0 для силових трансформаторів лімітується ДСТУ.

Електричні втрати P_e пропорційні квадрату струму, що протікає по обмотках. Тому ці втрати виражають через потужність короткого замикання у такий спосіб:

$$P_e = k_{нв}^2 P_{кн},$$

де $P_{кн}$ - потужність, що споживається трансформатором в режимі короткого замикання за умови, що $\dot{I}_1 = \dot{I}_{1н}$.

Залежності втрат трансформатора від його навантаження показані на рис. 6.7.

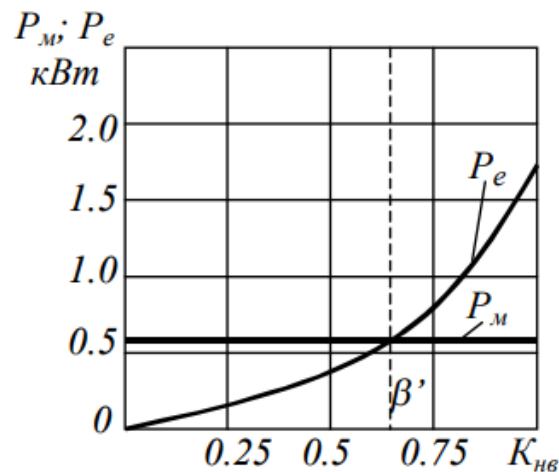


Рисунок 6.7. Залежність втрат трансформатора від його навантаження

Рівень $P_{\text{кн}}$ для силових трансформаторів лімітується ДСТ-ом.

Таким чином, активна потужність P_1 що надходить з мережі в первинну обмотку трансформатора, частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{e1} . Змінний магнітний потік викликає в магнітопроводі і конструктивних деталях магнітні втрати P_m . Потужність, що залишилася після цього, називається електромагнітною потужністю:

$$P_{\text{ем}} = P_1 - P_{e1} - P_m,$$

яка передається у вторинну обмотку, де частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{e2} . Активна потужність, що надходить в навантаження трансформатора

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

де $\sum P = P_{e1} + P_m + P_{e2}$ - сумарні втрати в трансформаторі. Усі види втрат, що супроводжують робочий процес трансформатора, показані на енергетичній діаграмі (рис. 6.8).

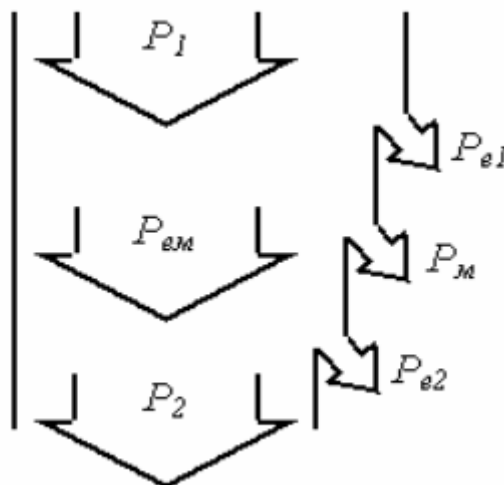


Рисунок 6.8 - Енергетична діаграма трансформатора

Коефіцієнт корисної дії (ККД) силових трансформаторів визначається загальною залежністю

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

де P_2 - активна потужність трансформатора, що віддається корисно; P_1 - споживана активна потужність трансформатора.

Визначити ККД трансформатора прямим виміром цих потужностей не-можливо, оскільки ККД силових трансформаторів дуже високий і досягає в трансформаторах великої потужності до 99%. При цьому велику роль грає похибка вимірів.

ККД трансформаторів, як правило, визначають непрямим методом, при якому потужність P_1 , виражають через P_2 , і втрати, тобто

$$P_1 = P_2 + P_m + P_e.$$

З огляду на те можна, що

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_e} = 1 - \frac{P_m + P_e}{P_2 + P_m + P_e}.$$

З огляду на те, що

$$P_2 = k_{\text{HB}} S_{\text{H}} \cos \varphi_2;$$

$$P_m = P_0;$$

$$P_e = k_{\text{HB}}^2 P_{\text{KH}}$$

одержимо наступну розрахункову залежність для ККД силових трансформаторів

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_e} = 1 - \frac{P_0 + k_{\text{HB}}^2 P_{\text{KH}}}{k_{\text{HB}} S_{\text{H}} \cos \varphi_2 + P_0 + k_{\text{HB}}^2 P_{\text{KH}}}.$$

Якщо в залежності ККД при $\cos \varphi_2 = \text{const}$ задати ряд значень $k_{\text{HB}} = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$, то одержимо залежність $\eta = f(k_{\text{HB}})$ (рис.6.9). Як правило силові трансформатори мають максимальну ККД при навантаженні менше номінальної.

Досвід експлуатації силових трансформаторів показав, що велику частину часу вони працюють з деяким недовантаженням, а меншу частину часу при номінальному навантаженні. Тому економічно вигідно мати максимальний ККД при $k_{\text{HB}} < 1$. Щоб визначити значення k_{HB} при якому $\eta = \eta_{\text{max}}$ необхідно вирішити похідну $\frac{d\eta}{dk_{\text{HB}}}$. Рішення цієї похідної дає результат $\eta = \eta_{\text{max}}$, коли $P_0 = k_{\text{HB}}^2 P_{\text{KH}}$, тобто коли постійні втрати в трансформаторі дорівнюють змінним втратам. Звідси знаходимо значення k_{HB} при якому ККД буде максимальним

$$k_{\text{HB}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{KH}}}}.$$

При побудові трансформаторів можна змінювати співвідношення між втратами в міді і сталі, тобто співвідношення між масами міді і сталі.

Силові масляні трансформатори розраховуються таким чином, щоб

$$\frac{P_0}{P_{\text{кн}}} \approx 0,25 \div 0,167.$$

Тому ККД має максимум при навантаженні 0,5-0,7 номінального (рис. 6.9)

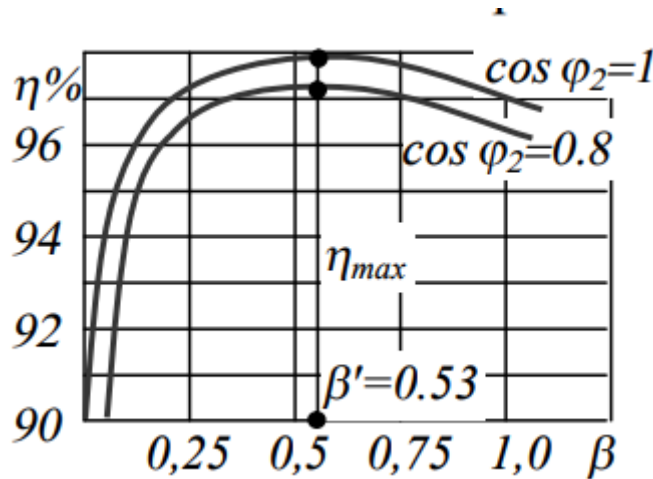


Рисунок 6.9 Графік залежності ККД трансформатора від навантаження

Регулювання напруги трансформаторів.

Спад напруги в трансформаторі і живильній мережі, коливання навантажень споживачів викликають коливання вторинної напруги трансформатора. Тому виникає необхідність регулювання напруги трансформаторів, що можна здійснити шляхом зміни коефіцієнта трансформації $k = w_1/w_2$, шляхом зміни числа витків первинної чи вторинної обмоток трансформатора. Для цієї мети обмотка виконується з відгалуженнями, а регулювання напруги виконується з допомогою відповідного перемикаючого пристрою. Перемикання відгалужень обмотки може виконуватися при відключенні трансформатора від мережі, або без відключення - під навантаженням. При першому способі перемикаючий пристрій простіший і дешевший, однак перемикання пов'язане з перервою енергопостачання споживачів і не може виконуватися часто. Тому цей спосіб застосовується головним чином для корекції вторинної напруги мережі понижуючих трансформаторів в залежності від рівня первинної напруги на даній ділянці мережі, а також при сезонних змінах напруги мережі в зв'язку із сезонною зміною навантаження. Переключення під навантаженням вимагає більш складного і дорогого перемикаючого пристрою і використовується в потужних трансформаторах при необхідності частого або безперервного регулювання напруги. Застосування трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням усе більш поширюється.

Трансформатори з перемиканням числа витків у відключеному стані (система перемикання без збудження (ПДВ)) виготовляються, відповідно до ДСТ 401-41, з регулюванням напруги щодо номінального на $\pm 5\%$ (силові трансформатори малої і середньої потужності) або на $\pm 2,5\%$ і $\pm 5\%$

(трансформатори великої потужності). У першому випадку трансформатор має три ступеня, а в другому п'ять ступеней напруги. Відгалуження доцільно виконувати на тій стороні, напруга на якій в процесі експлуатації піддається змінам. В трансформаторах, що експлуатуються при незмінній первинній напрузі $U_1 = \text{const}$ варіюють число витків w_2 у вторинній обмотці, тому що при збереженні $w_1 = \text{const}$ магнітний потік трансформатора, магнітні втрати і намагнічуючий струм залежать від відношення U_1/w_1 і залишаються майже постійними.

В трансформаторах, що експлуатуються при постійному навантаженні ($I_2 = \text{const}$) і первинній напрузі, що змінюється ($U_1 = \text{var}$), краще змінювати число витків у первинній обмотці так, щоб відношення U_1/w_1 підтримувалося приблизно постійним. При цьому магнітний потік трансформатора $\Phi = \frac{U}{w}$ при роботі на різних ступенях (відгалуженнях) міняється мало. Як правило це сторона вищої напруги. Виконання відгалужень на стороні вищої напруги має також ту перевагу, що при цьому через велику кількість витків добір (2,5% і 5%) кількості витків може бути зроблений з великою точністю. Крім того, струм на стороні вищої напруги менше і перемикач виходить більш компактним.

Ділянки обмотки, що переключаються, між відгалуженнями, доцільно розташовувати у вікні трансформатора по висоті обмотки в середній її частині, щоб розподіл частин обмотки, навантажених струмом, було стосовно ярем при роботі на різних відгалуженнях по можливості симетричним. У протилежному випадку магнітне поле розсіювання сильно спотворюється, що приводить до збільшення індуктивних опорів розсіювання і до різкого збільшення зусиль, що діють на обмотки при коротких замиканнях. З іншого боку, відгалуження краще виконувати з боку заземленої нейтралі (нульової точки) обмотки, тому що ізоляція перемикача при цьому полегшується.

На рис. 6.10 показані найбільш характерні схеми виконання обмоток з відгалуженнями. Схема рис. 6.10, а застосовується у випадку багатопровової циліндричної обмотки, і відгалуження розташовуються в верхньому шарі циліндричної обмотки. В схемі рис. 6.10, б обмотки виконуються з двох частин, намотаних у різні сторони, щоб ЕРС і МДС обмоток склалися, а не віднімалися.

В схемах рис. 6.10, а і б застосовується загальний перемикач для трьох фаз (рис. 6.11, а), а в схемах рис. 6.10, в і г кожна фаза має свій перемикач (рис. 6.11, б), тому що в цьому випадку між відгалуженнями різних фаз існує напруга $U \approx 0,5U_H$. Перемикачі розташовуються всередині бака трансформатора, а кінці осей перемикачів виводяться на кришку бака.

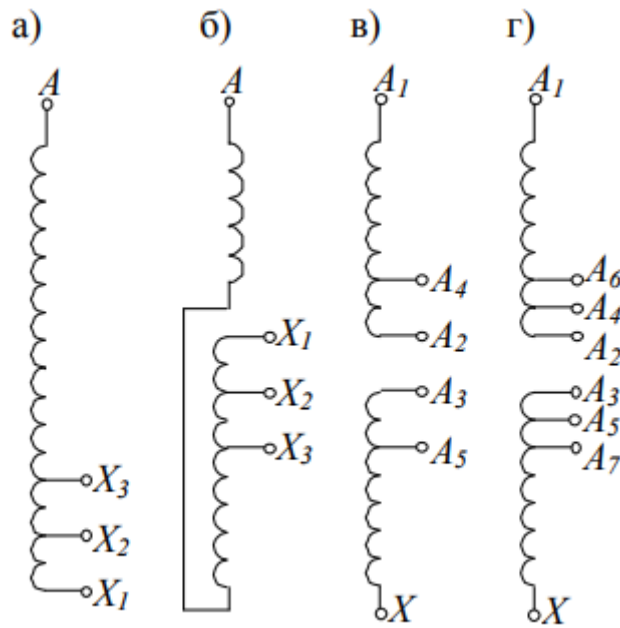


Рисунок 6.10. Схеми обмоток з відгалуженнями для регулювання напруги

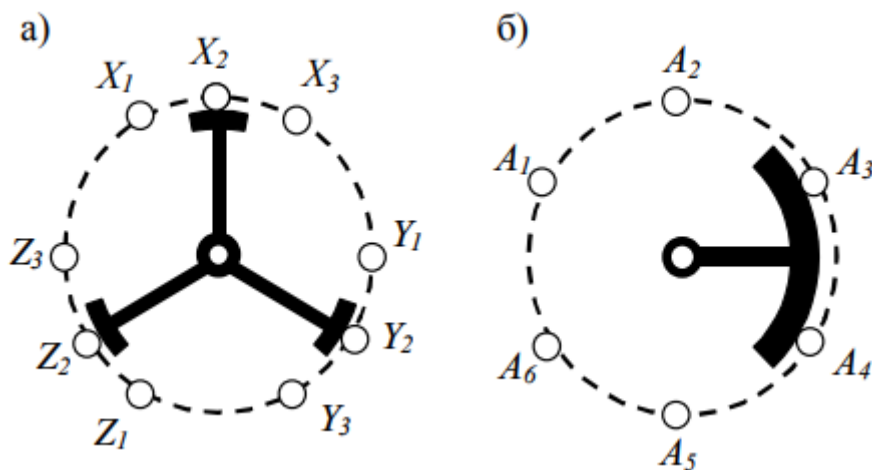


Рисунок 6.11. Схеми перемикачів для регулювання напруги

Трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням (РПН), як правило, розраховані для регулювання напруги в межах $\pm 10\%$ через 1% . У цих трансформаторах перехід з однієї ступені на іншу повинний відбуватися без розриву кола струму. Тому в проміжному положенні включені два сусідніх відгалуження обмотки і частина обмотки між ними виявляється замкнутою накоротко. Для обмеження струму короткого замикання застосовуються струмообмежуючі реактивні або активні опори.

На рис. 6.12 приведена схема перемикачів з струмообмежуючим реактором Р і показано п'ять послідовних позицій при переході з відгалуження X_1 (позиція а) на відгалуження X_2 (позиція д). У кожній із двох віток схеми перемикача є контактори (K_1 , K_2) для вимикання струму з даної вітки перед її перемиканням і рухливі контакти перемикача (Π_1 , Π_2), що розраховані для перемикачів віток без струму.

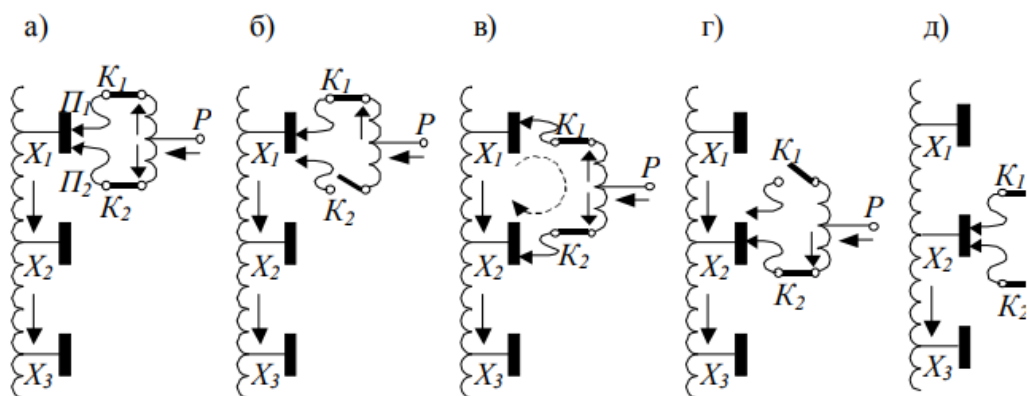


Рисунок 6.12 Схеми регулювання напруги під навантаженням з використанням струмообмежуючого реактора

У нормальному робочому положенні (позиції а і д) струми двох віток схеми обтікають дві половини обмотки реактора в різних напрямках. Тому потік у сердечнику реактора практично відсутній і індуктивний опір реактора малий. Навпаки, струм короткого замикання ступені, що виникає при проміжному положенні перемикача і показаний на рис. 6.12, в переривчастую лінією, обтікає всю обмотку реактора в однаковому напрямку, при цьому сердечник реактора намагнічується й опір реактора стосовно цього струму великий. Реактор Р і перемикач П містяться всередині бака трансформатора, а контактори К – у спеціальному додатковому баці, що монтується на бічній стінці бака трансформатора. При такому пристрої масло в баці трансформатора захищено від забруднення, викликуваного роботою контакторів при розриві ними ланцюга струму.

Найбільше поширення для регулювання напруги під навантаженням одержав перемикаючий пристрій з струмообмежувачами резисторами, схема якого для однієї фази показана на рис. 6.13. Перемикання під навантаженням виконується за допомогою швидкодіючого перемикача П і двох перемикачів П1, П2. Швидкодіючий перемикач П разом з струмообмежувачами резисторами R1 і R2 встановлюється в окремому баці, заповненому маслом. Він розраховується на струм, що з'являється при замиканні сусідніх відгалужень. Перемикачі П1 і П2 можуть переводитися з одного відгалуження на інше при відсутності струму в їхньому колі. На рис. 6.13 показане положення перемикачів П і П1, при якому трансформатор працює на відгалуженні X2. Для переходу на відгалуження X1 попередньо на це відгалуження переводять перемикач П1, а потім перемикач П під дією відповідного механізму швидко перекидається в положення, в якому він приєднується до контактів 1 і 2. Послідовність розмикання контактів 3 і 4 і замикання контактів 1 і 2 при цьому розраховано так, що коло робочого струму І не розривається. Швидко, за соті долі секунди, перемикання необхідне для того, щоб резистори R1 і R2 не перегрілись.

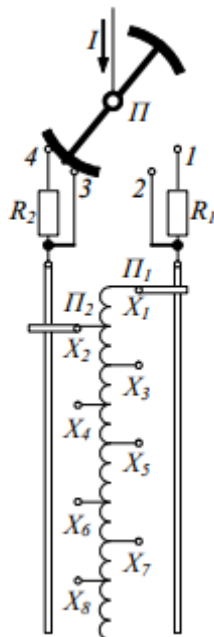


Рисунок 6.13. Схема регулювання напруги під навантаженням з використанням активних ступообмежуючих резисторів

Висновки.

1. Режим роботи трансформатора.

Трансформатор може працювати в режимах холостого ходу, короткого замикання і навантаження.

- Холостий хід — вторинна обмотка розімкнена, споживається потужність на покриття магнітних втрат.
- Коротке замикання — вторинна обмотка замкнута, а втрати обумовлені тільки електричним опором обмоток.
- Навантажувальний режим — поєднує обидва типи втрат.

2. Схеми заміщення і векторні діаграми.

Використання приведених схем заміщення спрощує аналітичне визначення струмів, напруг і втрат.

Векторні діаграми дозволяють оцінити зміни фазових співвідношень між напругою, ЕРС і струмом при різних видах навантаження.

3. Зовнішня характеристика трансформатора.

Залежність вихідної напруги $U_2 = f(I_2)$ при сталому $\cos \varphi_2$ описує поведінку трансформатора при зміні струму навантаження.

- При активно-індуктивному навантаженні напруга зменшується.
- При активно-ємнісному — збільшується.

4. Регулювання напруги.

Для підтримання стабільної вторинної напруги використовують зміни числа витків обмотки.

- Перемикання без збудження (ПБЗ) — виконують при вимкненому трансформаторі.

- Регулювання під навантаженням (РПН) — дозволяє змінювати напругу без відключення споживачів, забезпечуючи плавну компенсацію коливань у межах $\pm 10\%$.

5. Втрати потужності.

Втрати поділяються на:

- Магнітні (постійні) — у сталі магнітопроводу, практично не залежать від навантаження.
- Електричні (змінні) — у мідних обмотках, зростають пропорційно квадрату струму.

Загальні втрати визначають енергетичну ефективність трансформатора.

6. Коефіцієнт корисної дії (ККД).

ККД силових трансформаторів досягає 98–99 %, що визначається співвідношенням між активною потужністю на виході та сумою корисної потужності і втрат.

Максимальне значення ККД досягається, коли постійні втрати дорівнюють змінним, тобто при $P_0 = k_{\text{нв}}^2 P_{\text{кн}}$.

Економічно оптимальним є навантаження 0.5–0.7 від номінального.

7. Конструктивні особливості регулювання.

Відгалуження обмоток виконують переважно з боку вищої напруги, що спрощує ізоляцію перемикача і забезпечує точність регулювання.

Для обмеження струмів короткого замикання при РПН застосовують реактори або активні резистори.

Контрольні питання.

Які режими роботи трансформатора розрізняють і чим вони відрізняються?

Що таке приведена схема заміщення трансформатора і для чого її використовують?

Як виглядає векторна діаграма при активно-індуктивному та активно-ємнісному навантаженнях?

Від яких факторів залежить зовнішня характеристика трансформатора?

Як змінюється вихідна напруга трансформатора при збільшенні навантаження?

Як визначається відсоткова зміна напруги трансформатора ($\Delta U \%$)?

Які втрати виникають у трансформаторі при холостому ході, короткому замиканні та навантаженні?

Як обчислюється ККД трансформатора та при якому навантаженні він максимальний?

У чому полягає принцип регулювання напруги трансформаторів із перемиканням відгалужень?

Чим відрізняються трансформатори з регулюванням напруги без збудження від трансформаторів із регулюванням під навантаженням?

Які конструктивні рішення забезпечують точність і надійність перемикання відгалужень?

Які функції виконують струмообмежуючі реактори та резистори в схемах РПН?

Як визначити оптимальний коефіцієнт навантаження $k_{\text{нв}}$, при якому ККД максимальний?

Яким чином втрати впливають на вибір матеріалів обмоток і магнітопроводу трансформатора?

Які стандарти (ДСТУ) регламентують параметри та допуски при проектуванні і випробуваннях трансформаторів?

Використана література.

1. Гайденко Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
2. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
3. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331 с.

ТЕМА 7. ТРИФАЗНІ ТРАНСФОРМАТОРИ ТА ЇХ ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА

Трифазні магнітні системи. Особливості холостого ходу трифазних трансформаторів. Регулювання напруги трансформаторів. Паралельна робота трифазних трансформаторів. Схеми та групи з'єднання обмоток трансформаторів. Умови включення трансформаторів на паралельну роботу. Висновки.

Магнітопроводи трифазних трансформаторів.

В трифазних трансформаторах магнітопровід отримується об'єднанням магнітопроводів трьох однофазних трансформаторів (рис. 7.1).

При симетричній підведеній трифазній напрузі магнітні потоки окремих фаз трифазних трансформаторів також симетричні та створюють правильну трипроменеву зірку. Сума магнітних потоків фаз у будь-який момент часу дорівнює нулю. Внутрішні стрижні магнітопроводів можна конструктивно об'єднати в один. По цьому стрижню проходять усі магнітні потоки фаз. Але, оскільки сума магнітних потоків трьох фаз дорівнює нулю, загальний стрижень видаляється. Разом із цим можна зменшити загальну довжину магнітопроводу фази В та перетворити просторовий магнітопровід у плоский тристрижневий (рис. 7.2).

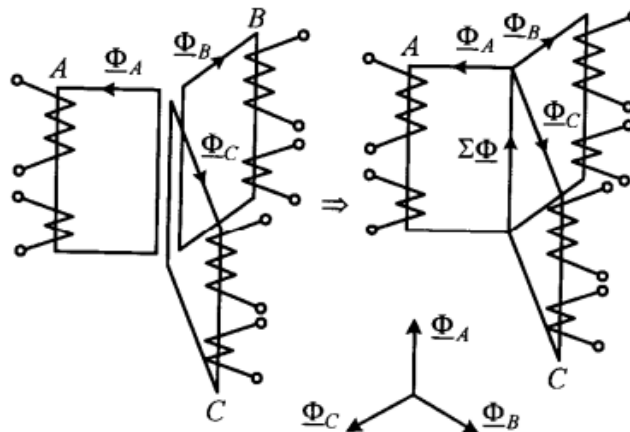


Рисунок 7.1 - Магнітопровід трифазного трансформатора як сукупність магнітопроводів однофазних трансформаторів

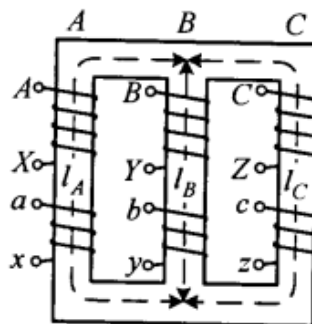


Рисунок 7.2. - Плоский тристрижневий магнітопровід трифазного трансформатора

Такий магнітопровід простий у виготовленні, має високу механічну міцність та набув найбільшого поширення. Його недоліком є магнітна несиметрія магнітопроводу. Вона обумовлена тим, що середні лінії магнітних потоків фаз мають різну довжину l_A, l_B, l_C . А Отже, магнітні опори магнітопроводів фаз А та С більші за опори фази В, яка не має ділянки ярма. Неоднаковість магнітних опорів призводить до неоднаковості намагнічувальних струмів (струмів неробочого ходу). Струм неробочого ходу середньої фази перевищує струми крайніх фаз на 20-40%.

Для зменшення магнітної несиметрії поперечний переріз ярем збільшують відповідно до поперечних перерізів стрижнів на 5-7%. Струми неробочого ходу дуже малі, тому навіть при невеликому навантаженні за рахунок накладання фазних струмів навантаження на фазні струми неробочого ходу несиметрию струмів за фазами повністю згладжується. При розгляді симетричних режимів вважається, що всі три фази працюють в однакових умовах, без впливу одна на одну.

Для трансформаторів особливо великої потужності магнітопровід виконується з трьох окремих однофазних стрижньових магнітопроводів. У цьому випадку трансформатор є магнітно незв'язаною трансформаторною групою.

Схеми з'єднання обмоток.

Обмотки трифазних трансформаторів можуть бути з'єднані зіркою Y , зіркою з нейтральним проводом Y_0 трикутником Δ , зигзагом із нейтральним проводом Z_0 (рис. 7.3).

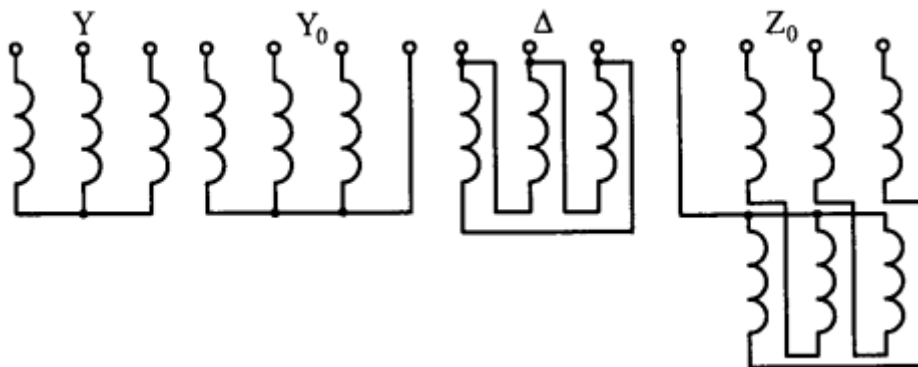


Рисунок 7.3- Схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів

Схеми Y , Y_0 , Δ використовуються для обмоток вищої та нижчої напруг.

Схема Z_0 використовується тільки для обмоток нижчої напруги спеціальних випрямних трансформаторів для усунення змушеного підмагнічування. У схемі Z_0 обмотка кожної фази розбивається на дві однакові частини, які розміщуються на двох сусідніх стрижнях та вмикаються зустрічно.

Для трифазних трансформаторів розрізняють фазні та лінійні коефіцієнти трансформації (індекси φ_i *lin* відповідно).

$$n_{\varphi} = \frac{U_{\varphi h}}{U_{\varphi l}}; \quad n_{lin} = \frac{U_{linh}}{U_{linl}}.$$

Якщо схеми з'єднання обмоток вищої та нижчої напруг однакові, то

$$n_{\varphi} = n_{lin} = \frac{N_h}{N_l}.$$

Для різних схем з'єднання обмоток вищої та нижчої напруг:

$$n_{lin} = \frac{\sqrt{3}U_{\varphi h}}{U_{\varphi l}} = \sqrt{3} n_{\varphi} \text{ для з'єднання } Y/\Delta;$$

$$n_{lin} = \frac{U_{\varphi h}}{\sqrt{3}U_{\varphi l}} = \frac{n_{\varphi}}{\sqrt{3}} \text{ для з'єднання } \Delta/Y.$$

Неробочий хід трифазних трансформаторів.

Аналіз процесів у трифазних трансформаторах можна проводити тільки для однієї фази. В інших фазах усе буде таким самим, але величини, що змінюються в часі за синусоїдним законом, будуть мати зсув за фазою на $\frac{2\pi}{3}$ та $\frac{4\pi}{3}$ та відносно першої фази. Для аналізу процесів у трифазних трансформаторах можна використовувати рівняння, схеми заміщення, векторні діаграми, які були отримані для однофазних трансформаторів. Відмінність має місце тільки в режимі неробочого ходу.

Як було встановлено, струм неробочого ходу (намагнічувальний струм) несинусоїдний. Цей струм крім першої гармоніки має вищі гармоніки, основна з яких третя.

Струм неробочого ходу фази А та струми неробочого ходу фаз В і С з урахуванням фазних зсувів відповідно:

$$I_{poA} = I_{pom1} \sin \omega t + I_{pom3} \sin 3\omega t;$$

$$I_{poB} = I_{pom1} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + I_{pom3} \sin 3 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$I_{poC} = I_{pom1} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + I_{pom3} \sin 3 \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right),$$

де I_{pom1} , I_{pom3} - амплітудні значення першої та третьої гармонік струму неробочого ходу трансформатора.

Перші гармоніки струму неробочого ходу всіх трьох фаз зсунуті на 120° одна від одної та створюють симетричну трифазну систему:

$$I_{poA1} = I_{pom1} \sin \omega t ;$$

$$I_{poB1} = I_{pom1} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$I_{poC1} = I_{pom1} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Треті гармоніки струмів неробочого ходу всіх трьох фаз за фазою збігаються:

$$I_{poA3} = I_{poB3} = I_{poC3} = I_{pom3} \sin 3\omega t.$$

Особливості неробочого ходу трифазних трансформаторів пов'язані саме з третьою гармонікою струму неробочого ходу. Її вплив проявляється залежно від схем з'єднання первинної та вторинної обмоток.

Схема з'єднання Y_0/Y

Треті гармоніки струмів неробочого ходу в усіх фазах у будь-який момент часу спрямовані однаково (рис. 7.4). Вони можуть замикатися крізь нейтральний провід та первинну мережу трансформатора. Отже, у складі струмів неробочого ходу, крім першої гармоніки, буде присутня третя гармоніка. Тобто, струми неробочого ходу несинусоїдні. Магнітні потоки всіх фаз синусоїдні, тому що закон їх змінювання визначається законом змінювання напруги живильної мережі. Жодних ускладнень у роботі трансформатора немає.

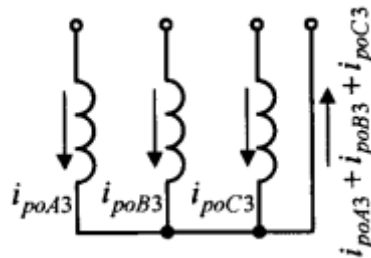


Рисунок 7.4 - Треті гармоніки струму неробочого ходу при схемі з'єднання Y_0

Схема з'єднання Y/Y .

Треті гармоніки струмів неробочого ходу в усіх фазах спрямовані однаково у будь-який момент часу, тому вони не можуть замикатися крізь сусідні фази (рис. 7.5). Контур для третіх гармонік струмів відсутній. Отже, струми неробочого ходу всіх фаз є синусоїдними функціями часу. При цьому змінюється форма кривої магнітного потоку в часі $\Phi(\omega t)$.

Форма кривої магнітного потоку $\Phi(\omega t)$ визначається графічно (рис. 7.6). При синусоїдному струмі неробочого ходу магнітний потік є несинусоїдною функцією часу. $\Phi(\omega t)$ сплющується, окрім першої гармоніки у складі магнітного потоку є вищі, головна з яких - третя (рис. 7.7).

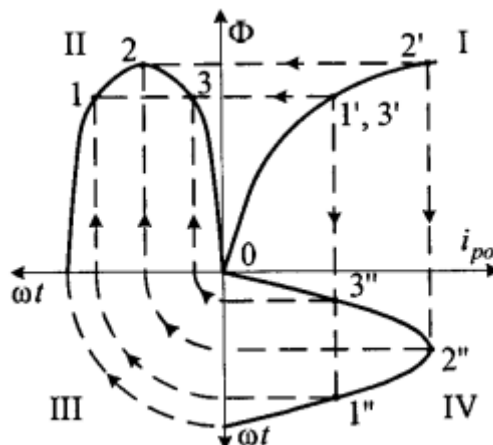


Рисунок 7.6 - Побудова кривої магнітного потоку/

При додаванні гармонік вищих порядків ($v > 3$) крива $\Phi(\omega t)$ сплющується, провал кривої $\Phi(\omega t)$ майже зникає.

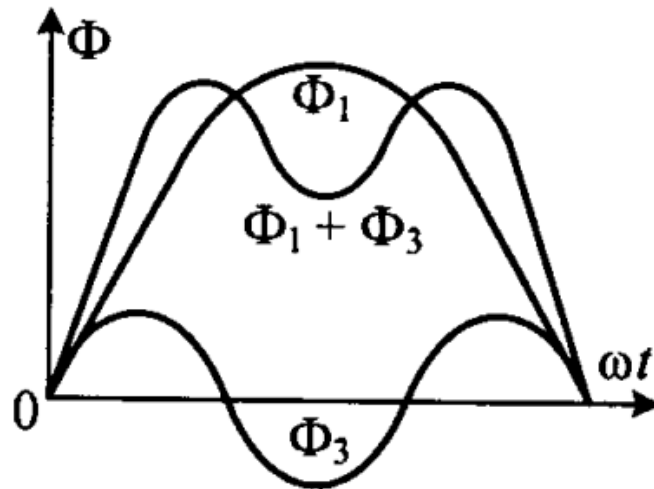


Рисунок 7.7 – Вплив третьої гармоніки на форму кривої $\Phi(\omega t)$

За аналогією з третьою гармонікою струму неробочого ходу треті гармоніки магнітних потоків в усіх трьох фазах збігаються за фазою та в усіх стрижнях магнітопроводу спрямовані однаково у будь-який момент часу (рис. 7.8). Тому треті гармоніки магнітного потоку не можуть замикатися крізь сусідні стрижні магнітопроводу. Вони замикаються від верхнього ярма до нижнього крізь кришку бака, стінки бака, конструктивні елементи та значні повітряні проміжки.

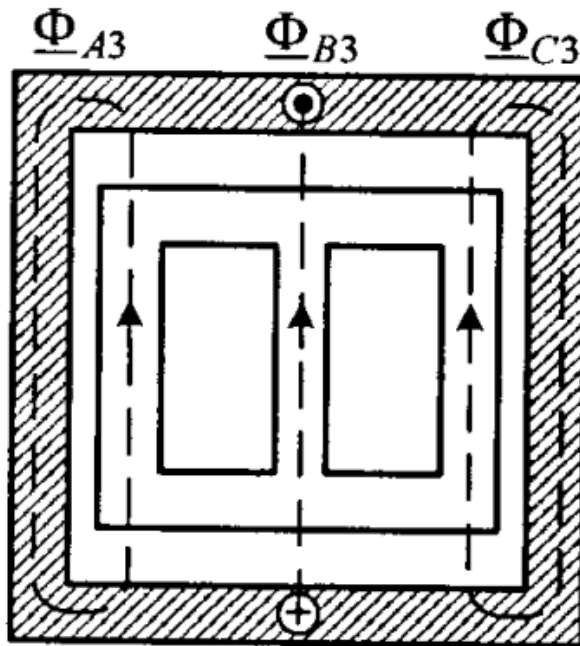


Рисунок 7.8 - Контури замикання третіх гармонік магнітних потоків фаз при схемі з'єднання обмоток Y/Y

Магнітний опір на шляху третьої гармоніки потоку дуже великий. Тому треті гармоніки магнітного потоку невеликі за амплітудою: $\Phi_{max3} \leq 0,10 \Phi_{max1}$. Треті гармоніки магнітного потоку індукують у первинній та вторинній обмотках ЕРС потрібної частоти. При цьому $E_{max3} \leq 0,3E_{max1}$ (тому що $f_3 = 3f_1$)

Наявність ЕРС потрібної частоти призводить до викривлення фазних ЕРС, що небажано. ЕРС потрібної частоти у складі лінійної ЕРС відсутні, тому що ЕРС потрібної частоти в усіх фазних обмотках за фазою збігаються. Наприклад: $\underline{E}_{AB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B = \underline{E}_{A1} + \underline{E}_{A3} - \underline{E}_{B1} - \underline{E}_{B3} = \underline{E}_{A1} - \underline{E}_{B1}$.

Треті гармоніки магнітного потоку, замикаючись по конструктивних елементах, створюють додаткові магнітні втрати. Ці додаткові втрати можуть сягати половини основних магнітних втрат, що призводить до додаткового нагрівання трансформатора.

Для трансформаторної групи контур замикання третьої гармоніки такий самий, як і для першої гармоніки. Тому ЕРС потрібної частоти дуже велика та сягає 60% від ЕРС першої гармоніки. При цьому викривлення фазних ЕРС недопустимо великі. Тому схема Y/Y не рекомендована до використання у трансформаторних групах.

Схема з'єднання Y/ Δ

Контур замикання для третьої гармоніки струму неробочого ходу у первинній обмотці відсутній. Отже, струм неробочого ходу синусоїдний, магнітний потік несинусоїдний, крім першої гармоніки містить третю гармоніку.

Третя гармоніка магнітного потоку Φ_{p3} індукує в первинній та вторинній обмотках ЕРС потрібної частоти. Вторинна обмотка з'єднана Δ , тобто являє собою замкнений контур. В усіх фазних обмотках третя гармоніка ЕРС спрямована однаково. Під впливом цих ЕРС у контурі вторинної обмотки протікають струми потрібної частоти I_{s3} (рис. 7.9). Струм I_{s3} збуджує в кожному із стрижнів магнітопроводу магнітний потік Φ_{s3} , який також у будь-який момент часу в цих стрижнях спрямований однаково.

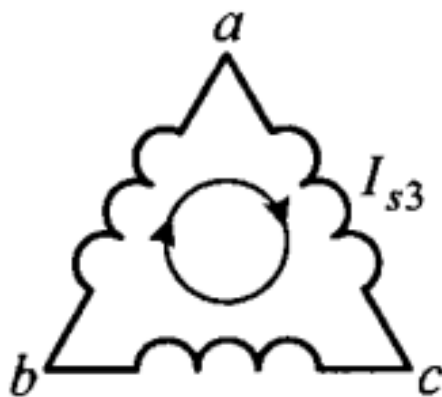


Рисунок 7.9-Контур замикання третіх гармонік фазних струмів при схемі з'єднання Δ

При практично суто індуктивному опорі вторинної обмотки магнітні потоки Φ_{p3} та Φ_{s3} знаходяться практично у протифазі та взаємно компенсуються (за принципом Ленца) (рис. 7.10). Тому ускладнення у роботі трансформатора відсутні.

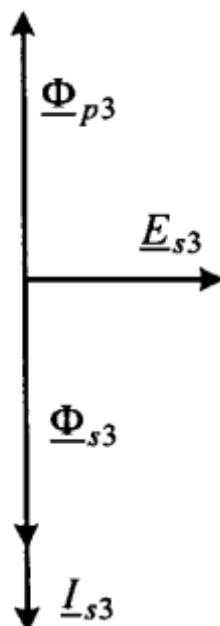


Рисунок 7.10 - Векторна діаграма третіх гармонік магнітних потоків, ЕРС та струмів

Схема з'єднання Δ / Y

Первинна обмотка створює замкнений контур, по якому замикається третя гармоніка струму неробочого ходу. Отже, струм неробочого ходу не-синусоїдний, а при цьому магнітні потоки фаз трансформатора, як установлено, є синусоїдальні функції часу. Тому ускладнення у роботі трансформатора відсутні.

Таким чином, наявність обмотки, яка з'єднана за схемою Δ на первинній або вторинній стороні трансформатора, видаляє ускладнення в його роботі. Тобто з'єднання хоча б однієї обмотки у Δ бажано.

Групи з'єднання трансформаторів/

На одному стрижні магнітопроводу однофазного трансформатора розташовано обмотки вищої АХ та нижчої ах напруг (рис. 7.11, а). Напрямок намотки та спосіб маркування кінців обмоток вищої та нижчої напруг однаковий. Обидві обмотки зчеплені з однаковим потоком взаємної індукції Φ . ЕРС обмоток вищої напруги $\underline{E}_{ax}$ та АХ нижчої напруги $\underline{E}_{ax}$ індексуються цим магнітним потоком. У цьому випадку вони за фазою співпадають. Фазовий зсув між ЕРС $\underline{E}_{AX}$ та $\underline{E}_{ax}$ $\psi = 0$.

При зміні напрямку намотки (рис. 7.11, б) або способу маркування кінців обмотки нижчої напруги фаза ЕРС $\underline{E}_{ax}$ зміниться на 180° . Таким

чином, трансформатор, крім коефіцієнта трансформації, характеризується ще фазовим зсувом ЕРС обмоток вищої та нижчої напруг.

Фазовий зсув у визначає групу з'єднання трансформатора. Кутові зсуви ЕРС відповідають однойменним кутовим зсувам напруг. Надалі використовується фазовий зсув саме напруг.

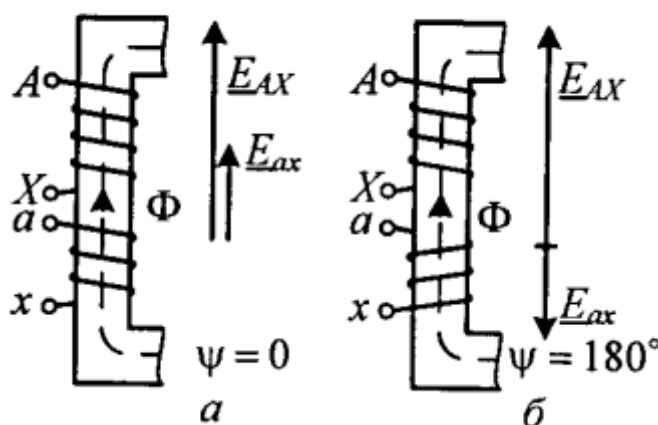


Рисунок 7.11 -Визначення фазового зсуву ЕРС однофазного трансформатора

Номер групи визначається за формулою:

$$N = \frac{\psi}{30^\circ},$$

де 30° -це дискретність повороту вектору на комплексній площині при симетричній трифазній системі.

Таким чином, у першому випадку $N = \frac{0}{30^\circ} = 0$ - нульова група; у другому випадку $N = \frac{180^\circ}{30^\circ} = 6$ - шоста група.

За стандартом усі однофазні трансформатори повинні мати тільки нульову групу (наявність двох груп створює незручності в експлуатації).

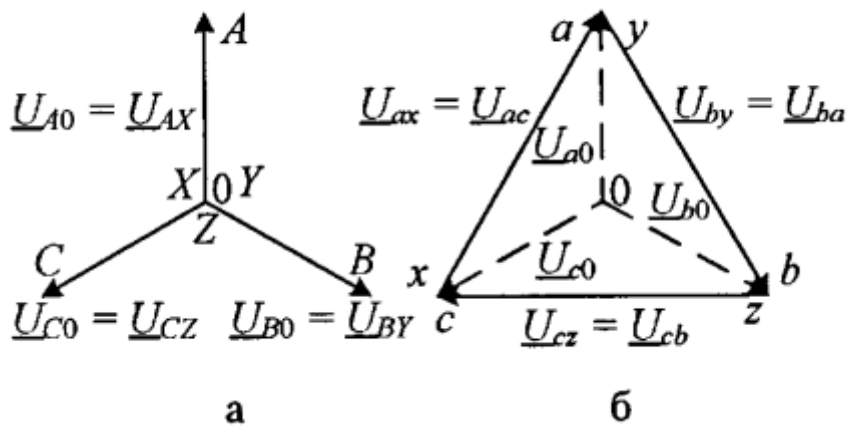
Позначення однофазного трансформатора I/I-0 - однофазний трансформатор, який належить до нульової групи або який має нульову групу з'єднання обмоток.

У трифазних трансформаторах на відміну від однофазних визначення фазового зсуву напруг обмоток вищої та нижчої напруг не достатньо очевидно. У трифазних трансформаторах група з'єднання обмотки залежить від схеми з'єднання обмоток вищої та нижчої напруг, напрям-ку намотування обмоток та їх маркування.

Згідно з міжнародним стандартом групою з'єднання обмотки є кутовий зсув між векторами, що являють собою напруги між нейтраллю (реальною або уявною) та однойменними виведеннями обмоток вищої та нижчої напруг.

На векторних діаграмах напруг (рис. 7.12) наведено розташування векторів $\underline{U}_{AO}$, $\underline{U}_{BO}$, $\underline{U}_{CO}$, $\underline{U}_{ao}$, $\underline{U}_{bo}$, $\underline{U}_{co}$, які відповідають напругам між нейтраллю та виведеннями обмоток. Для схеми з'єднання Y нейтраль є

реальною, для схеми з'єднання Δ нейтраль є уявною, але уявна нейтраль легко створюється, наприклад, при підключенні вимірювальних приладів.



а - обмоток вищої напруги Y; б - обмоток нижчої напруги Δ
Рисунок 7.12 - Векторні діаграми напруг при з'єднанні.

Для визначення групи з'єднань обмоток трифазних трансформаторів будуються суміщені векторні діаграми напруг обмоток вищої та нижчої напруг. Суміщення векторних діаграм означає електричне з'єднання виведень А та а обмоток вищої та нижчої напруг відповідно. При визначенні величини фазового зсуву вектор $\underline{U}_{A0}$ приймається як базовий, тобто відлік кута ψ здійснюється від вектора $\underline{U}_{A0}$ до вектора $\underline{U}_{a0}$ за стрілкою годинника.

При однакових схемах обмоток, напрямках намотки обмоток та способах маркування виведень обмоток вищої та нижчої обмоток однойменні напруги між нейтраллю та виведеннями обмоток $\underline{U}_{A0}$ і $\underline{U}_{a0}$, $\underline{U}_{B0}$ і $\underline{U}_{b0}$, $\underline{U}_{C0}$ і $\underline{U}_{c0}$ за фазою збігаються, тобто фазовий зсув $\psi = 0$ (рис. 7. 13).

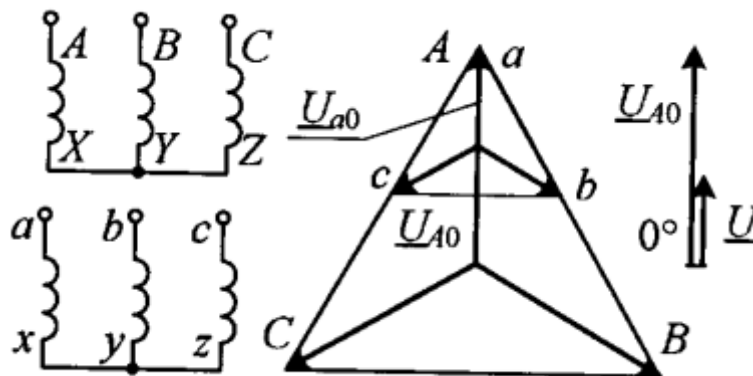


Рисунок 7.13 - Схеми з'єднань та векторні діаграми напруг обмоток вищої та нижчої напруг трансформатора Y/Y-0

При відмінних схемах обмоток, або напрямках намотки обмоток, або способах маркування виведень обмоток фазовий зсув ψ мінним від нуля. буде відмінним від нуля.

При зміні тільки способу маркування виведень однієї з обмоток фази напруг змінюваної обмотки зміняться на 180° . Наприклад, для схеми з'єднань на рис. 2.13 при зміні способу маркування виведень обмоток нижчої напруги фази напруг $\underline{U}_{a0}$, $\underline{U}_{b0}$ і $\underline{U}_{c0}$ зміняться на 180° . Фазовий зсув між напругами $\underline{U}_{A0}$ і $\underline{U}_{a0}$ становить 180° (рис. 7.14). Отже, група з'єднання обмоток шоста. Такий трансформатор має маркування $Y/Y-6$.

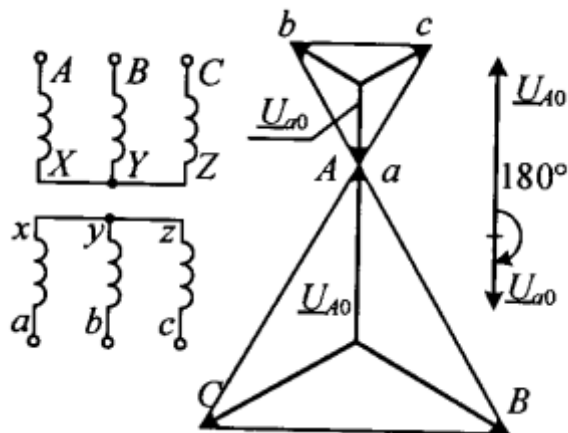


Рисунок 7.14- Схеми з'єднань та векторні діаграми напруг обмоток вищої та нижчої напруг трансформатора $Y/Y-6$

При здійсненні колового перемаркування виведень однієї з обмоток фази напруг змінюваної обмотки змінюються на кут, кратний 60° .

Наприклад, для схеми з'єднань на рис. 2.60 при коловому перемаркуванні виведень обмоток нижчої напруги змінюється розташування фазних обмоток нижчої напруги по відношенню до розташування обмоток вищої напруги (рис. 7.15). Фазовий зсув між напругами $\underline{U}_{A0}$ і $\underline{U}_{a0}$ становить 120° . Отже, група з'єднання обмоток четверта. Такий трансформатор має маркування $Y/Y-4$.

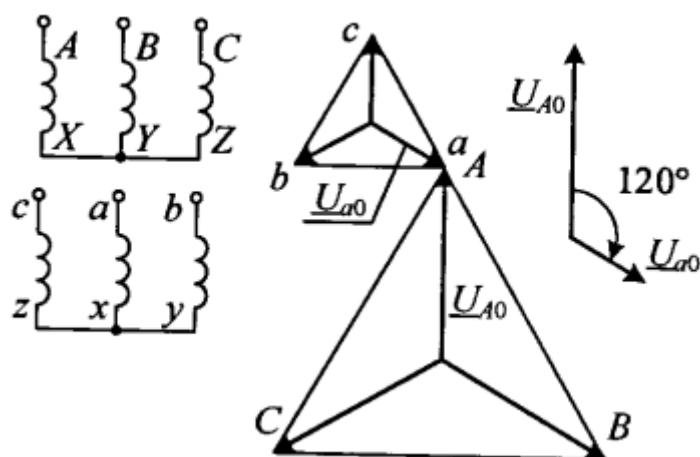


Рисунок 7.15 Схеми з'єднань та векторні діаграми напруг обмоток вищої та нижчої напруг трансформатора $Y/Y-4$

При зміні схеми з'єднань обмоток фази напруг змінюваної обмотки також змінюються на кут, кратний на 30° . Наприклад, для схеми

з'єднань на рис. 7.13 при змінненні схеми з'єднань обмоток нижчої напруги з Y на Δ фазовий зсув між напругами $\underline{U}_{A0}$ і $\underline{U}_{a0}$ становить 330° (рис. 7.16). Отже, група з'єднання обмоток одинадцята. Такий трансформатор має маркування $Y/\Delta - 11$.

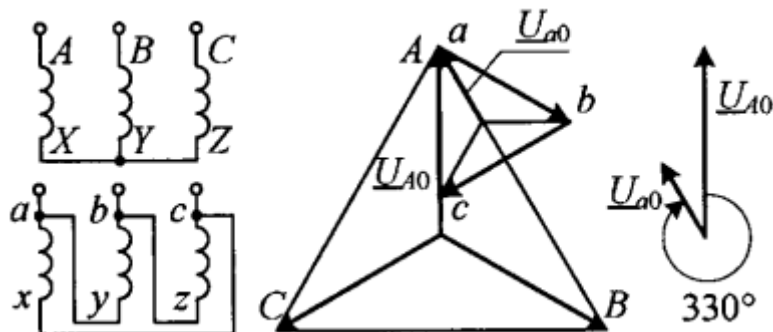


Рисунок 7.16 - Схеми з'єднань та векторні діаграми напруг обмоток вищої та нижчої напруг трансформатора $Y/\Delta - 11$

Для визначення групи використовується також годинниковий спосіб (рис. 7.64): вектор напруги обмотки вищої напруги вважається великою стрілкою годинника та спрямовується на число 12. Вектор напруги обмотки нижчої напруги вважається малою стрілкою годинника. Він і показує групу з'єднання обмоток трансформатора.

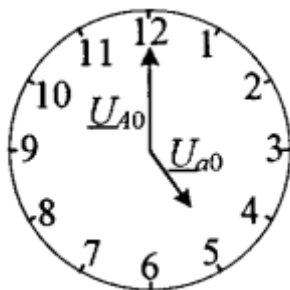


Рисунок 7.17 -Годинниковий спосіб визначення груп з'єднання обмоток трансформатора

При схемі з'єднання обмоток Y/Y можна отримати всі парні групи, а при з'єднанні Y/Δ – всі непарні. Крім того, розрізняють основні групи 0, 6, 11, 5 та похідні 4, 8, 10, 2, 3, 7, 9, 1, які можна отримати перемаркуванням по колу вивідних кінців вторинних фазних обмоток.

Стандарт обмежує кількість груп та обумовлює схеми з'єднань.

Передбачаються такі схеми та групи з'єднання трифазних двообмоткових трансформаторів: Y/Y_0-0 , $Y_0/Y-0$, $\Delta/\Delta-0$; Δ/Y_0-11 , $\Delta/Y-11$, $Y_0/\Delta-11$, Y_0/Z_0-11 .

Паралельна робота трансформаторів.

Вимоги та умови паралельної роботи трансформаторів

На практиці трансформатори, як правило, працюють паралельно один з одним. При цьому підвищується надійність енергопостачання, спрощується ремонт та обслуговування трансформаторів. Під час зменшення навантаження частина трансформаторів може бути вимкнена для того, щоб трансформатори, що залишилися у системі, працювали у номінальному режимі (під час малого навантаження ККД та коефіцієнт потужності суттєво зменшуються).

Вимоги до паралельної роботи трансформаторів.

1. Між паралельно працюючими трансформаторами не повинні протікати зрівняльні струми.

2. Усі паралельно працюючі трансформатори повинні навантажуватися пропорційно своїм номінальним потужностям.

Для дотримання вимог необхідно виконувати умови:

1) усі трансформатори повинні мати однакові коефіцієнти трансформації, $n_1 = n_2 = \dots = n$;

2) усі трансформатори мають належати до однієї групи з'єднань (або всі до 0, або всі до 11);

3) усі трансформатори повинні мати однакову напругу короткого замикання. $U_{k1}\% = U_{k2}\% = \dots = U_{kn}\%$.

Для виявлення наслідків порушення умов підключення трансформаторів на паралельну роботу аналізується невиконання кожної умови окремо.

Паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації

Нехай друга та третя умови підключення трансформаторів на паралельну роботу виконуються точно, а перша - порушена: трансформатори мають різні коефіцієнти трансформації.

Два однофазних трансформатора Т1 та Т2 (рис. 7.18) підключено паралельно та знаходяться в режимі неробочого ходу (вимикач Q розімкнуте).

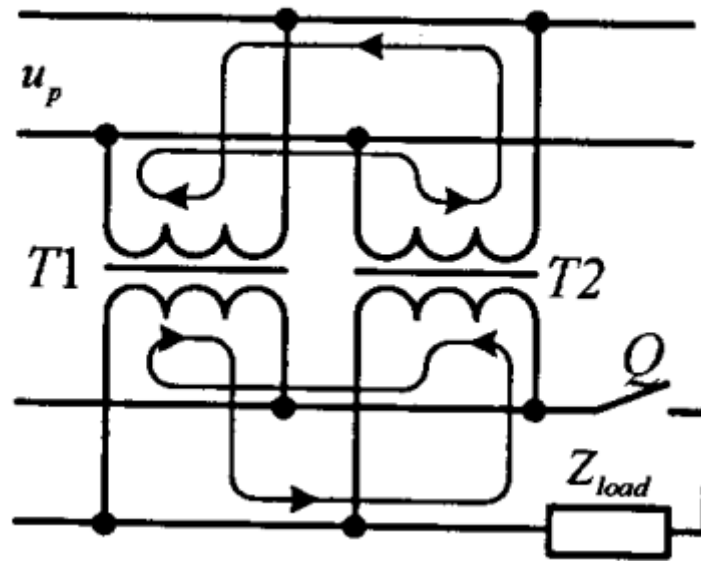


Рисунок 7.18 - Схема трансформаторів, підключених на паралельну роботу

При співвідношенні коефіцієнтів трансформації $n_1 < n_2$ напруга вторинної обмотки першого трансформатора більше напруги вторинної обмотки другого трансформатора:

$$U_{s1} = \frac{U_p}{n_1} > U_{s2} = \frac{U_p}{n_2}.$$

У контурі, що створено вторинними обмотками трансформаторів, діє різницева напруга $\Delta U = U_{s2} - U_{s1}$. Під впливом напруги ΔU в цьому контурі виникає зрівняльний струм.

Відповідно до рівняння струмів трансформаторів будь-яка зміна струму вторинної обмотки призводить до зміни струму первинної обмотки. Отже, зрівняльний струм буде протікати і в контурі, який створено первинними обмотками.

Тоді зрівняльний струм

$$I_n = \frac{\Delta U}{Z_{k1} + Z_{k2}}$$

де Z_{k1} і Z_{k2} - опори короткого замикання першого та другого трансформаторів (їх внутрішні опори) зі сторони виходу трансформаторів.

Опір короткого замикання зі сторони входу трансформатора

$$Z_k = Z_p + Z_s = Z_p + Z_s \cdot \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2.$$

Тоді опір короткого замикання зі сторони виходу трансформатора

$$Z_k = Z_p + Z_s = Z_p + Z_s \cdot \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2$$

При суто індуктивних опорах обмоток трансформатора $\underline{Z}_{k1}$ і $\underline{Z}_{k2}$ зрівняльні струми першого I_{n1} та другого I_{n2} трансформаторів знаходяться у протифазі по відношенню до кінців обмоток a_1x_1 і a_2x_2 (рис. 7.19).

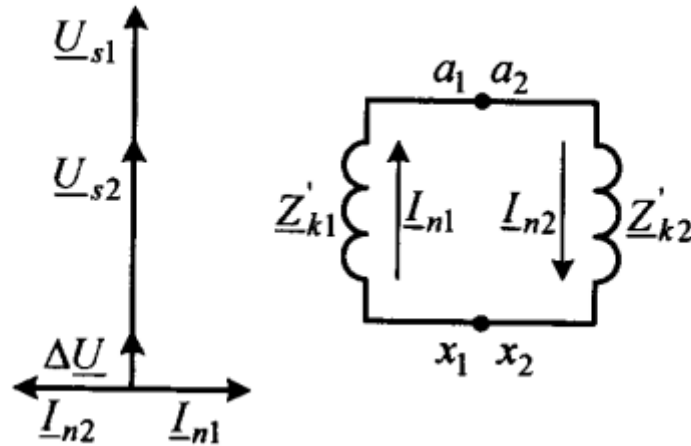


Рисунок 7.19 - Векторна діаграма напруг трансформаторів, увімкнених на паралельну роботу з різними коефіцієнтами трансформації, в режимі неробочого ходу

Зрівняльний струм виражається за допомогою параметрів трансформатора.

Різницева напруга між вторинними обмотками обох трансформаторів, увімкнених на паралельну роботу,

$$\Delta U = U_{s1} - U_{s2} = U_p \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right) = U_p \left(\frac{n_2 - n_1}{n_1 \cdot n_2} \right).$$

При невеликій відмінності коефіцієнтів трансформації n_1 та n_2 їхнє середнє квадратичне дорівнює середньому арифметичному:

$$n_{mid} = \sqrt{n_1 \cdot n_2} \cong \frac{n_1 + n_2}{2}.$$

Також при невеликій відмінності коефіцієнтів трансформації n_1 та n_2 номінальні напруги вторинних обмоток приблизно дорівнюють одна одній та їх середньому значенню:

$$\begin{aligned} U_{mid} &\cong U_{s1} \cong U_{s2} \cong U_{sN}. \\ \Delta U &= \frac{U_p}{n_{mid}} \left(\frac{2(n_2 - n_1)}{n_1 + n_2} \right) = U_{smid} \cdot \Delta n \cong U_{sN} \cdot \Delta n. \end{aligned}$$

Зрівняльний струм виражається у відносних одиницях:

$$I_n^* = \frac{I_n}{I_{s1N}} = \frac{\Delta U}{(\underline{Z}_{k1} + \underline{Z}_{k2}) I_{s1N}} = \frac{\Delta n}{\frac{\underline{Z}_{k1} \cdot I_{s1N}}{U_{sN}} + \frac{\underline{Z}_{k2} \cdot I_{s1N}}{U_{sN}}}.$$

Якщо знехтувати активними опорами обмоток, опори $\underline{Z}_{k1}$ і $\underline{Z}_{k2}$ матимуть суто індуктивний характер. Тому величина зрівняльного струму трансформатора розраховується як скалярна величина. Для цього другий член знаменника (2.169) помножується та ділиться на I_{s2N} і U_{sN} .

Після перегрупування отримується розрахункова формула для інженерних розрахунків:

$$I_n^* = \frac{\Delta n}{u_{k1}^* + u_{k2}^* \frac{S_{N1}}{S_{N2}}}.$$

Наприклад, для двох однакових трансформаторів із повними потужностями $S_{N1} = S_{N2}$, напругами короткого замикання $u_{k1}^* = u_{k2}^* = 0,05$, різницею коефіцієнтів трансформації $\Delta n = 0,5$ зрівняльний струм

$$I_n^* = \frac{0,05}{0,05 + 0,05} = 0,5.$$

Зрівняльний струм дорівнює половині номінального струму, що неприпустимо. Тому на параметр Δn накладаються жорсткі обмеження: Δn повинен не перевищувати 0,005. Тобто коефіцієнти трансформації всіх паралельно працюючих трансформаторів можуть відрізнятися від середнього коефіцієнта трансформації не більше ніж на 0,5%.

Для аналізу режиму навантаження (на рис. 7.19 вимикач Q замкнено) для паралельно працюючих трансформаторів застосовується метод накладання, тобто сумарний первинний струм трансформатора розглядається як сума навантажувального I_1 та зрівняльного I_n струмів:

$$I_{\Sigma 1} = I_{l1} + I_{n1};$$

$$I_{\Sigma 2} = I_{l2} + I_{n2}.$$

На векторну діаграму паралельно працюючих трансформаторів у режимі неробочого ходу накладається векторна діаграма зрівняльних струмів (рис. 7.19).

На рис. 7.20 наводиться векторна діаграма струмів та напруг двох трансформаторів однакової потужності з активно-індуктивним навантаженням, що увімкнені на паралельну роботу.

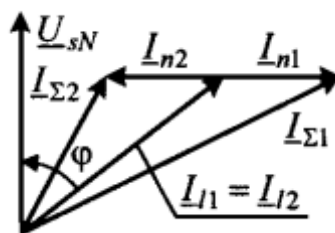


Рисунок 7.20 - Векторна діаграма для трансформаторів, увімкнених на паралельну роботу з різними коефіцієнтами трансформації, в режимі навантаження.

За рахунок накладання зрівняльного струму перший трансформатор із меншим коефіцієнтом трансформації опиняється перевантаженим, а другий трансформатор з більшим коефіцієнтом трансформації недовантаженим.

Тривале перевантаження трансформаторів неприпустиме з умов нагріву, тому загальне навантаження трансформаторів необхідно зменшувати доти, доки перевантажений трансформатор вийде до режиму

номінально-го навантаження. Недовантажений трансформатор при цьому опиниться недовантаженим ще більше.

Паралельна робота трансформаторів, які належать до різних груп з'єднання.

Нехай перша та третя умови підключення трансформаторів на паралельну роботу виконуються точно, друга умова порушена: трансформатори, які працюють паралельно, мають різні групи з'єднання.

Якщо перший трансформатор має групу 0, а другий 11, то вторинні лінійні напруги обох трансформаторів $\underline{U}_{s1lin}$ та $\underline{U}_{s2lin}$ дорівнюють одна одній за величиною, але мають фазовий зсув 30° (рис. 7.21).

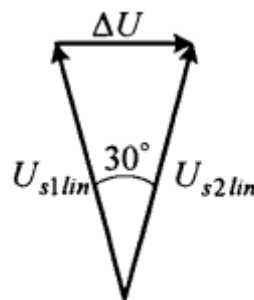


Рисунок 7.21-Векторна діаграма лінійних напруг паралельно працюючих трансформаторів з різними групами з'єднання

У замкненому контурі, який створено вторинними обмотками трансформаторів, діє різницева напруга

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_{s1lin} - \underline{U}_{s2lin} .$$

З трикутника на векторній діаграмі отримується:

$$\Delta \underline{U} = 2 \underline{U}_{s1lin} \sin 15^\circ = 0,52 \underline{U}_{s1lin} .$$

Наявність різницевої напруги ΔU призведе до протікання зрівняльного струму

$$I_n^* = \frac{\Delta \underline{U}}{\underline{Z}_{k1} + \underline{Z}_{k2}}$$

Через те що напруга ΔU дуже велика, струм $I_n = 4-7) I_{p1N}$. Такий струм неприпустимий за умовами нагріву. Паралельна робота трансформаторів з різними групами з'єднання категорично неприпустима.

Паралельна робота трансформаторів з різними напругами короткого замикання.

Нехай перша та друга умови підключення трансформаторів на паралельну роботу виконуються суворо, третя умова порушена: трансформатори, що працюють паралельно, мають різні напруги короткого замикання.

Для визначення розподілення струмів між паралельно працюючими трансформаторами використовується спрощена схема заміщення (рис. 7.22). Відношення струмів трансформаторів обернено пропорційно відношенню їх опорів короткого замикання:

$$I_1 : I_2 = \frac{1}{Z_{k1}} : \frac{1}{Z_{k2}}.$$

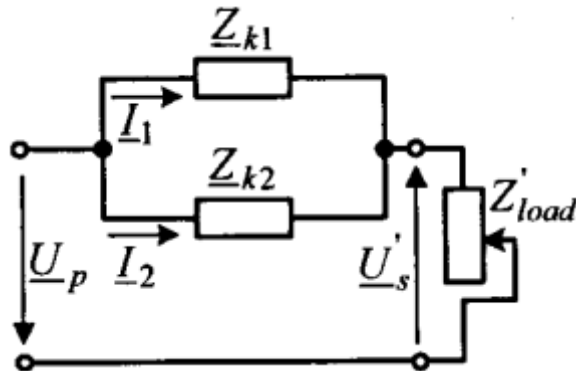


Рисунок 7.22 - Спрощена схема заміщення паралельно працюючих трансформаторів із різними напругами короткого замикання

Кожен член правої частини помножується та ділиться на відповідний номінальний струм, крім того, права частина ділиться на номінальну напругу першого трансформатора та за умови $U_{pN1} = U_{pN2}$:

$$I_1 : I_2 = \frac{I_{N1}}{u_{k1*}} : \frac{I_{N2}}{u_{k2*}}.$$

Якщо напруги короткого замикання однакові в обох трансформаторів, то вони навантажуються струмами, пропорційними номінальним.

Якщо ліву та праву частини помножити на U_{pN1} , то отримується формула, за якою розраховується потужність навантаження паралельно працюючих трансформаторів:

$$S_1 : S_2 = \frac{S_{N1}}{u_{k1*}} : \frac{S_{N2}}{u_{k2*}}.$$

Якщо напруги короткого замикання обох трансформаторів дорівнюють одна одній, то трансформатори навантажуються пропорційно своїм номінальним потужностям. Якщо, наприклад, у першого трансформатора напруга короткого замикання менша, то він буде перевантажений. Тривале перевантаження трансформатора не припустимо, тому доводиться зменшувати загальне навантаження трансформаторів доти, доки перевантажений трансформатор не буде у режимі номінального навантаження. Другий трансформатор при цьому опиниться недовантаженим. Відповідно до стандарту напруги короткого замикання окремих трансформаторів можуть відрізнятися від середнього значення всіх u_k не більше, ніж $\pm 10\%$. Широкий допуск на відхилення u_k пояснюється тим, що дійсна величина u_k залежить від багатьох факторів, у тому числі від технологічних. Як правило, u_k визначається приблизно.

Установлено, що зі зростом потужності трансформатора величина u_k зростає. Тому існує обмеження щодо співвідношення потужностей трансформаторів, які працюють паралельно. А саме, відношення потужностей має бути не більше 1:3.

Величина потужності навантаження трансформаторів, що працюють паралельно, може бути визначена за допомогою зовнішніх характеристик. Нахил зовнішніх характеристик визначається зміною напруги трансформатора $\Delta u\%$. У свою чергу, величина $\Delta u\%$ визначається величиною $u_k\%$. Чим більша напруга короткого замикання, тим більший нахил зовнішньої характеристики, тим менший струм навантаження при однаковій напрузі на первинних обмотках паралельно працюючих трансформаторів.

Наприклад, $u_{k1} < u_{k2}$. Трансформатор із меншою напругою короткого замикання перевантажується. Це можна побачити з графіка зовнішніх характеристик (рис. 7.23).

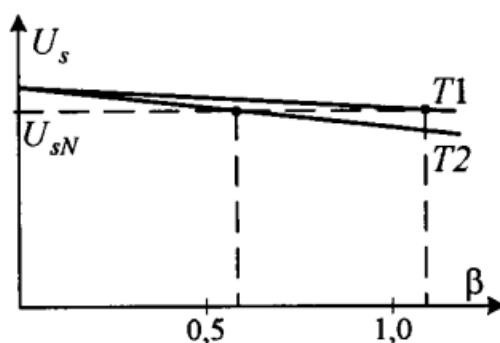


Рисунок 7.23 - Зовнішні характеристики паралельно працюючих трансформаторів із різними напругами короткого замикання.

Важною практичною задачею є визначення потужності навантаження кожного з паралельно працюючих трансформаторів за відомим загальним навантаженням та відомими номінальними даними.

Значення потужності навантаження одного з трансформаторів:

$$S_1 = S_2 \frac{\frac{S_{N1}}{u_{k1}^*}}{\frac{S_{N2}}{u_{k2}^*}}.$$

Загальна потужність навантаження

$$S = S_1 + S_2.$$

Тоді потужність навантаження другого трансформатора

$$S_2 = S - S_1.$$

Потужність навантаження першого трансформатора:

$$S_1 = (S - S_2) \frac{\frac{S_{N1}}{u_{k1}^*}}{\frac{S_{N2}}{u_{k2}^*}} = S \frac{\frac{S_{N1}}{u_{k1}^*}}{\frac{S_{N1}}{u_{k1}^*} + \frac{S_{N2}}{u_{k2}^*}}.$$

Потужність навантаження довільного x -го трансформатора

$$S_x = \sum_{i=1}^n S_i \frac{\frac{S_{Nx}}{u_{kx}^*}}{\sum_{x=1}^n \frac{S_{Nx}}{u_{kx}^*}}.$$

де $\sum_{i=1}^n S_i$ - загальна потужність навантаження n трансформаторів, що працюють паралельно; S_N - номінальна потужність x -го трансформатора; u_{kx}^* — напруга короткого замикання x -го трансформатора.

Висновки.

1. При паралельній роботі двох або більше трансформаторів необхідно забезпечити рівномірний розподіл навантаження між ними, що досягається за умови однакових груп з'єднання обмоток, близьких коефіцієнтів трансформації та напруг короткого замикання.

Потужність, яку сприймає кожен трансформатор, прямо пропорційна його номінальній потужності та обернено пропорційна напрузі короткого замикання.

Для розрахунку потужності окремих трансформаторів при відомому загальному навантаженні використовують залежності, що враховують параметри кожного агрегата (номінальна потужність, напруга короткого замикання).

Паралельна робота забезпечує підвищення надійності системи електропостачання, можливість резервування та зменшення втрат енергії при частковому навантаженні.

Недотримання умов паралельної роботи призводить до виникнення циркуляційних струмів, нерівномірного навантаження та перевантаження окремих трансформаторів.

Контрольні питання.

1. Які основні умови повинні виконуватись для паралельної роботи трансформаторів?
2. Як впливають відмінності у напругах короткого замикання на розподіл навантаження між трансформаторами?
3. Яким чином визначається потужність кожного трансформатора при паралельній роботі?
4. У яких випадках допускається паралельне вмикання трансформаторів різних потужностей?
5. Які переваги забезпечує паралельна робота трансформаторів у системах електропостачання?
6. Які наслідки можуть виникнути при порушенні умов паралельної роботи?
7. Що таке напруга короткого замикання та як вона впливає на розподіл навантаження?
8. Як визначається загальна потужність трансформаторів, що працюють паралельно?
9. Які заходи підвищують ефективність і надійність паралельної роботи?
10. Чому паралельне з'єднання трансформаторів вважається енергетично доцільним?

Використана література.

1. Гайденко Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
2. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
3. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331 с.

ТЕМА 8. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

Принцип перетворення енергії в електричних машинах. Електрорушійна та магніторушійна сили обмоток машин змінного струму. Електрорушійна сила обмотки статора. Способи обмеження вищих гармонік. Магніторушійна сила однофазної та трифазної обмоток. Способи створення обертового магнітного поля. Висновки.

Машини змінного струму підрозділяються на три основні види: асинхронні, синхронні та колекторні. Конструктивно як ті, так і інші машини мають нерухому частину, що зветься статором, та обертову частину, що зветься ротором. Звичайно ротор розташовується всередині статора.

В основі роботи електричних машин змінного струму лежить принцип обертового магнітного поля, частота обертання n_1 якого визначається частотою мережі f_1 та числом пар полюсів обмотки статора p , об/хв:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

Асинхронною називають таку електричну машину, частота обертання ротора n якої відрізняється від частоти обертання магнітного поля n_1 та змінюється залежно від навантажувального моменту.

Синхронною називають таку електричну машину змінного струму, частота обертання ротора якої при будь-якому режимі роботи дорівнює частоті обертання магнітного поля $n=n_1$.

Асинхронні та синхронні машини розрізняються за принципом дії, будовою їхніх роторів, але статори цих машин мають практично однакову конструкцію. Будови обмоток статора, створення МРС, наведення в обмотках ЕРС обертовим магнітним полем є спільними як для асинхронних, так і для синхронних машин.

Створення обертового магнітного поля за допомогою обмотки статора

На рис. 8.1 наведені поперечні розрізи двополюсного асинхронного двигуна (АД) із шістьма пазами на статорі (пази позначені кружечками).

У шести пазах зображена найпростіша трифазна обмотка статора. Кожна фаза складається з одного витка (А-А', В-В', С-С'). Провідники кожного витка розташовані один від одного на відстані полюсного ділення $\tau = \pi D_a / 2p$, де D_a – діаметр внутрішньої розточки статора.

Крок витка $y = \tau$. Подвійному полюсному діленню 2τ відповідає кут по колу статора, що дорівнює 2π електричних градусів. Початки фаз А, В, С зсунуті один відносно одного в просторі на кут $2\pi/3$ електричних градусів. Обмотка статора приєднується до мережі трифазного змінного струму. Струми у фазах зсунуті в часі на кут $2\pi/3$ електричних градусів.

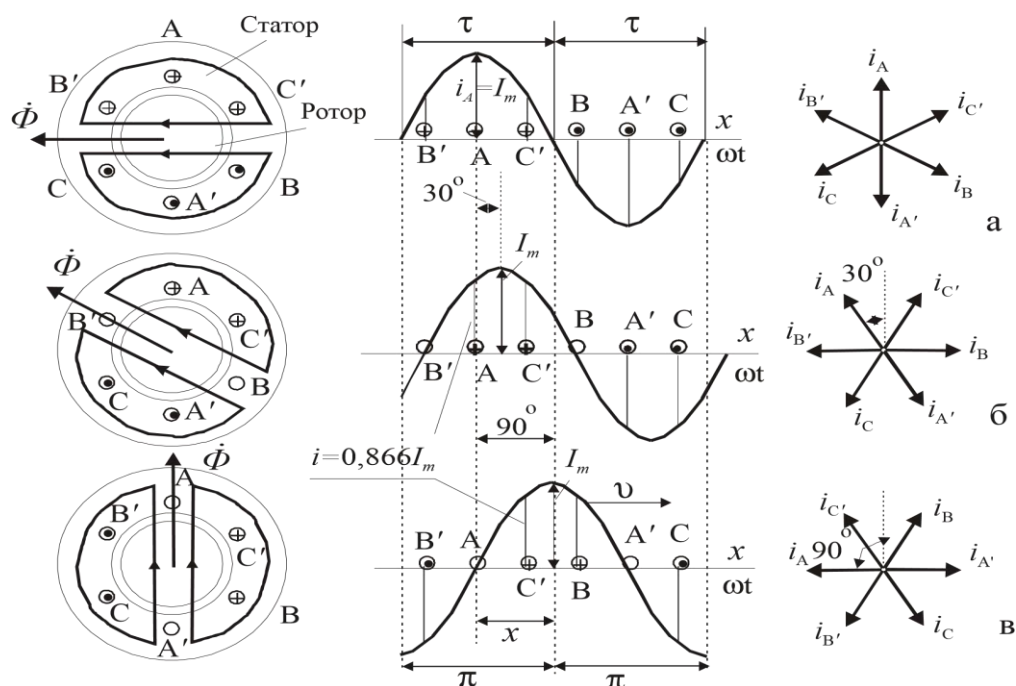


Рисунок 8.1 - Принцип створення обертового магнітного поля

На рис. 8.1 показаний характер магнітного поля статора для трьох моментів часу. Напрямки позитивних струмів у провідниках позначені «+», а негативних – «•». Струми обмотки статора створюють дво полюсний магнітний потік Φ , що проходить через статор, ротор та повітряний зазор між ними. Напрямок результуючого вектора магнітного потоку Φ визначений за правилом буравчика. На векторній діаграмі показані напрямки струмів у провідниках обмотки статора для моменту часу, коли $i_A = i_m$ та $i_B = i_C = -0,5 i_m$ (рис. 8.1,а).

Криві розподілу струмів уздовж розгорнутого статора укладають дві зони, кожна величиною τ . Напрямки струмів у цих зонах протилежні. З цих кривих очевидно, що струми розподілені за синусоїдальним законом.

Змінимо фазу струмів на 30 електричних градусів (рис. 8.1,б). Миттєві значення струмів у відповідних фазах будуть такими:

$$i_A = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m; i_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m; i_B = 0.$$

При зміні фази струмів на 30 електричних градусів крива розподілу струмів та магнітний потік повертаються на 30 електричних градусів у напрямку проходження фаз.

Якщо фаза струмів зміниться на $\pi/2$ електричних градусів у часі, то вектор магнітного потоку Φ повернеться на такий же кут у просторі у бік проходження фаз: А, В, С (рис. 8.1,в). При зміні фази струмів на 2π електричних градусів вектор магнітного потоку зробить повний оберт.

Таким чином, трифазна обмотка статора двополюсної машини при живленні її симетричним трифазним струмом створює двополюсне обертове магнітне поле.

Лінійна швидкість переміщення хвилі (рис. 8.1,в) $-\vartheta = \frac{dx}{dt}$.

Координату x , у якій струм досягає свого максимального значення I_m ,

можна одержати, прийнявши, що $\sin\left(\omega t = \frac{\pi \cdot x}{\tau}\right) = 1$.

При цьому $\vartheta = 2\tau \cdot f_1$, м/с.

За один період магнітне поле переміщується на пару полюсних поділок. Частота обертання хвилі, що біжить, або частота обертання магнітного поля (n_1 , об/хв) визначається з виразу для лінійної швидкості переміщення хвилі

$$\vartheta = \frac{\pi \cdot D_a \cdot n_1}{60},$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

Отже, змінюючи число полюсів $2p$ обмотки, можна діставати різні частоти обертання магнітного поля. Щоб змінити число полюсів обмотки статора, необхідно змінити розподіл струмів у провідниках обмотки статора. Для створення магнітного поля з $2p = 4$ необхідно вже 6 витків із повним кроком, розташованих у 12 пазах статора з чергуванням фаз: A, C', B, A', C, B' (рис. 8.2). Кожна фаза такої найпростішої обмотки статора складається з двох витків, зсунутих один відносно одного на 2τ . Ці витки можуть бути з'єднані один з одним послідовно або паралельно.

З рис. 8.2 очевидно, що така обмотка створює криву розподілу струму та магнітне поле з $2p = 4$. Це поле також є обертовим і за один період струму повертається на кут 2τ , що відповідає у даному випадку половині

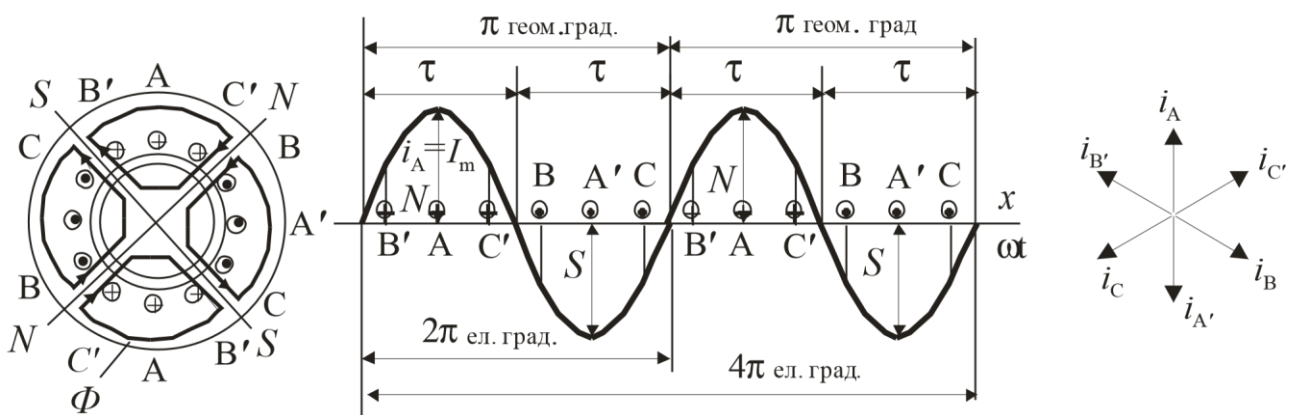


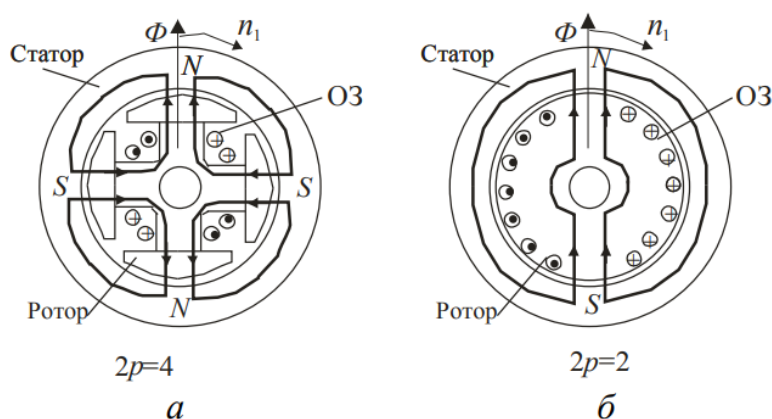
Рисунок 8.2 - Створення обертового поля з числом полюсів $2p=4$

Таким чином, за один період зміни змінного струму магнітне поле повертається в просторі на кут $\alpha_{\text{геом}} = 2\pi/p$, що відповідає одній парі полюсів. 2π геометричних градусів відповідає $(2\pi \cdot p)$ електричних градусів, тобто

$$\alpha_{\text{ел}} = p \cdot \alpha_{\text{геом}}.$$

Створення обертового магнітного поля за допомогою індуктора

Основне магнітне поле в синхронній машині (СМ) створюється обмоткою збудження, розташованою на роторі. Ця обмотка підмиюється до джерела постійного струму через ковзні контакти. Ротор разом з обмоткою збудження називають індуктором.



а – явнополюсний; б – неявнополюсний

Рисунок 8.3 - Основні типи роторів синхронних машин

За будовою ротора розрізняють машини з явнополюсним ротором, у котрих котушки обмотки збудження (ОЗ) розміщені на полюсах, що виступають (рис. 8.3,а), та машини з неявнополюсним ротором, у яких обмотка збудження є розподіленою та покладена в пази ротора (рис. 8.3,б).

Якщо подати напругу постійного струму на обмотку збудження та привести ротор в обертання з частотою n_1 , то магнітне поле, створене обмоткою збудження, також буде обертатися з частотою n_1 .

Розподіл магнітної індукції поля збудження вздовж кола статора залежить від форми повітряного зазору. Якщо повітряний зазор δ постійний, то магнітна індукція в повітряному зазорі $B_\delta(x)$ розподіляється за трапецієвидним законом (рис. 8.4, крива 1). Одним із способів наближення кривої B_δ до синусоїди є скіс полюсних наконечників (рис. 8.4, крива 2).

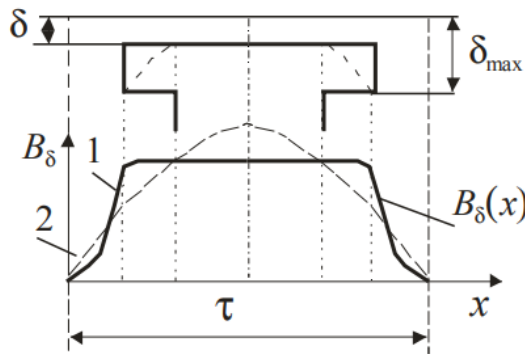


Рисунок 8.4 - Графіки розподілу $B_{\delta}(x)$

Трифазна обмотка статора СМ виконується з таким же числом полюсів, що й індуктор. При навантаженні струми обмотки статора створюють обертове магнітне поле. Поля статора та ротора обертаються з однаковою частотою n_1 і створюють у зазорі єдине магнітне поле.

Таким чином, у синхронній машині ротор обертається з такою ж частотою, що і магнітне поле, звідки й назва – синхронні машини.

Електрорушійна сила в обмотках машин змінного струму

ЕРС в обмотках машин змінного струму характеризується трьома параметрами: частотою, величиною, формою кривої.

Електрорушійна сила провідника

Розташуємо провідник на статорі, а магнітне поле нехай створюється, як у синхронній машині, системою обертових полюсів індуктора з $n = \text{const}$. При обертанні магнітного поля відносно провідника в ньому індукується ЕРС. За один оберт магнітного поля ЕРС у провіднику зробить p періодів, а за n обертів в хвилину – $(p \cdot n)$ періодів.

Частота ЕРС, що індукується (число періодів у секунду),

$$f_1 = \frac{p \cdot n}{60}.$$

За законом електромагнітної індукції ЕРС у провіднику

$$e_{\text{пр}} = B_{\delta x} \cdot l_{\text{пр}} \cdot v_{\text{пр}},$$

де

$B_{\delta x}$ – величина магнітної індукції в місці розташування провідника;

$v_{\text{пр}}$ – лінійна швидкість руху провідника відносно поля.

При незмінній швидкості $v_{\text{пр}}$ та незмінній довжині провідника $l_{\text{пр}}$ миттєве значення ЕРС ($e_{\text{пр}}$) залежить тільки від розподілу магнітної індукції в зазорі $B_{\delta} = f(x)$ уздовж кола статора, що повторюється на подвійному полюсному діленні. Періодична крива магнітної індукції $B_{\delta}(x)$ (рис. 8.5) у загальному випадку несинусоїдальна та може бути розкладена в гармонійний ряд.

Внаслідок того, що крива індукції для всіх полюсів має однаковий розподіл та симетрична відносно осі абсцис, то при розкладанні будуть мати місце тільки непарні гармоніки. Крім основної $B_{\delta 1}(x)$, на рис. 8.5

показані ще дві вищі непарні гармонійні – $B_{\delta 3}(x)$, $B_{\delta 5}(x)$. Перша гармонійна (основна) має амплітуду $B_{\delta 1max}$, розподілена на $2p$ полюсних поділках і має період $2\tau_1$. Вищі гармонійні мають менші амплітуди $B_{\delta 3max}$, $B_{\delta 5max}$ та відповідно періоди $2\tau_1/3$ й $2\tau_1/5$. Отже, на одній полюсній поділці τ_1 першої гармоніки укладається ν полюсних поділок ($\tau \nu$) ν -х гармонік

$$\tau = \tau_{\nu 1} / \nu.$$

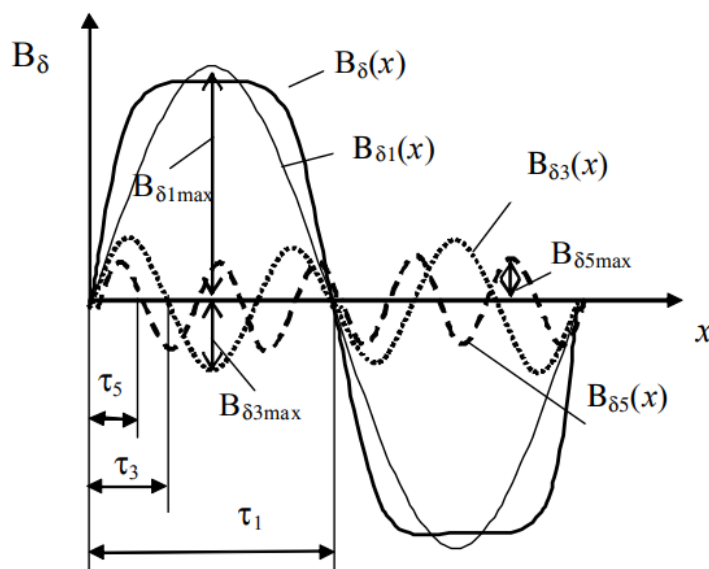


Рисунок 8.5 - Розкладання кривої індукції магнітного поля на гармонійні складові

Гармоніки кривої поля називаються просторовими, тому що розподіл гармонік індукції є функцією просторових координат та від часу не залежить.

Характер зміни в часі ЕРС, індукованої у провіднику, або форма кривої ЕРС провідника залежно від часу точно відповідає кривій розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі $B_{\delta}(x)$ по колу статора.

Розрахуємо величину ЕРС провідника, яка індукується основною просторовою гармонійною магнітного поля $\nu = 1$. При обертанні ротора синусоїдна хвиля магнітної індукції переміщається відносно статора з лінійною швидкістю

$$\vartheta_1 = \frac{\pi D n}{60} = 2\tau_1 f_1$$

та індукує у провіднику ЕРС

$$e_{\text{пр}1} = E_{\text{max}1} \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot t),$$

де амплітуда ЕРС

$$E_{\text{max}1} = B_{\delta 1max} \cdot l_{\text{пр}} \cdot \vartheta_1 = B_{\delta max} \cdot l_{\text{пр}} \cdot 2\tau_1 \cdot f_1.$$

Діюче значення ЕРС провідника

$$E_{\text{пр}1} = \frac{E_{\text{max}1}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} B_{\delta max} \cdot l_{\text{пр}} \cdot \tau_1 \cdot f_1 = 2,22 f_1 \Phi_{m1}.$$

де $\Phi_{m1} = l_{\text{пр}} \cdot \tau_1 B_{\delta \text{ср}1}$ – амплітуда магнітного потоку полюса.

Ця формула може бути використана для визначення ЕРС від вищих гармонік магнітного поля, якщо підставляти відповідні значення $B_{\delta \text{ср}v}$

$$E_{\text{пр}v} = 2,22 f_v \Phi_{mv}.$$

де $\Phi_{mv} = I_{\text{пр}} \cdot \tau_1 / v B_{\delta \text{ср}v}$ – v -та гармонійна складова потоку.

Частота ЕРС, що індукуюється полями вищих гармонійних, залежить від способу створення обертового магнітного поля.

У синхронних машинах усі гармонійні складові магнітного поля обертаються з однаковою лінійною швидкістю $\vartheta_v = \vartheta_1$, тому що створені обмоткою ротора, а ротор обертається з частотою $n = n_1 = \text{const}$:

$$\vartheta_v = 2\tau_v f_v,$$

звідки частота ЕРС v -ї гармоніки

$$f_v = f_1 v.$$

Тобто просторові гармоніки магнітного поля порядків $v = 3, 5, \dots$ створюють у кривій ЕРС часові гармоніки з частотою, в v разів більшою.

В асинхронних машинах магнітне поле створюється обмоткою статора та частота обертання поля v -х гармонік у v разів менша від частоти обертання поля першої гармонійної:

Тому частота ЕРС, індукованих полями вищих гармонік, збігається з частотою ЕРС від основної гармоніки

Діюче значення результуючої ЕРС

$$E_{\text{пр}} = \sqrt{E_{\text{пр}1}^2 + E_{\text{пр}3}^2 + E_{\text{пр}5}^2 + \dots + E_{\text{пр}v}^2} \approx E_{\text{пр}1}$$

Наявність вищих гармонік майже не впливає на величину діючого значення, але може сильно змінити форму результуючої ЕРС.

Електрорушійна сила провідника при скосі пазів

У ряді випадків як у синхронних, так і в асинхронних машинах для поліпшення форми кривої ЕРС здійснюється скос пазів відносно магнітного поля, яке обертається.

При цьому фаза ЕРС, індукованих в окремих ділянках провідника (рис. 5.6) синусоїдально розподіленим магнітним полем, безперервно змінюється уздовж провідника й елементарні ЕРС ΔE , індуковані на кінцях провідника, зсунуті за фазою на кут

$$\gamma_{\text{ск}1} = \frac{b_{\text{ск}}}{\tau_1} \cdot \pi,$$

де $b_{\text{ск}}$ – величина скосу.

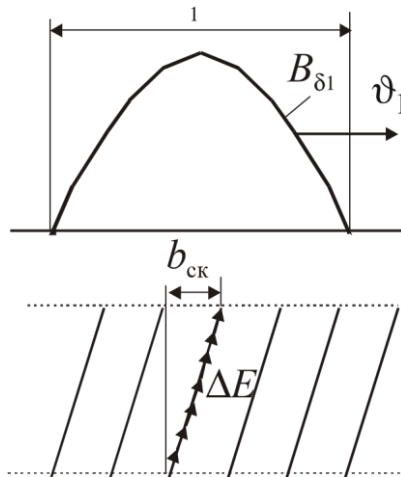


Рисунок 8.6 - ЕРС провідника коефіцієнта скосу при скосі пазів

Звичайно скіс невеликий і значення $K_{ск1} \approx 1$.

Таким чином, діюче значення ЕРС провідника при його скосі

$$E_{пр1} = 2,22 \cdot f_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot K_{ск1}.$$

Електрорушійна сила витка та котушки

Розглянемо виток котушки, відносно якого переміщується магнітне поле (рис. 8.4,а). Якщо виток виконується з повним кроком ($y = \tau$), то провідники 1 та 2 (рис. 8.4) займають однакове положення відносно полюсів першої гармоніки магнітного поля. Тому в обох провідниках наводяться однакові за величиною перші гармонійні ЕРС $E'_{пр1} = E''_{пр1} = E_{пр1}$, а кут зсуву між ними $\gamma = (E'_{пр1} \wedge E''_{пр1}) = 180^\circ$.

Оскільки провідники, створюючи виток, з'єднуються зустрічно (кінець «к» одного провідника з'єднується з кінцем «к» іншого провідника), то при послідовному обході витка ці ЕРС додаються (рис. 8.4,б), тобто

$$E_{вит1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot K_{ск1}.$$

У витку з укороченим кроком (виток 1-2') провідник 2' розташовується на відстані $y < \tau$ відносно провідника 1. Провідники витка займають у магнітному полі різне положення, що характеризується відносним кроком $\beta = y / \tau$. У цьому випадку ЕРС двох активних сторін витка рівні за величиною але зсунуті за фазою на кут $\gamma = \beta \cdot \pi$.

ЕРС витка дорівнює геометричній різниці ЕРС провідників (рис. 8.4,в).

Діюче значення першої гармонійної ЕРС витка можна знайти за векторною діаграмою на рис. 8.4,в

$$E_{вит1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot K_{ск1} \cdot K_{y1}.$$

де K_{y1} – коефіцієнт скорочення кроку обмотки

Коефіцієнт скорочення враховує зменшення ЕРС при $y \neq \tau$ та дорівнює відношенню геометричної суми ЕРС провідників витка до їхньої арифметичної суми.

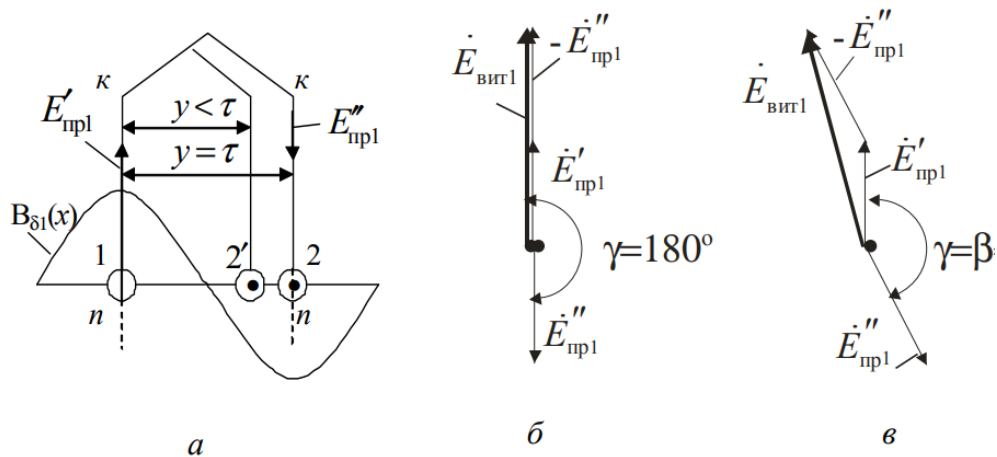


Рисунок 8.7 - До визначення ЕРС витка

При діаметральному кроці $y = \tau$ скорочення $\beta = 1$ та $k_{y1} = 1$.

Група послідовно з'єднаних витків, що покладені у ті самі пази та мають, крім ізоляції окремих витків, також спільну ізоляцію від стінок паза, називається катушкою. Якщо катушка має w_k витків, то діюче значення першої гармонійної ЕРС катушки

$$E_{k1} = w_k \cdot E_{\text{вит1}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot w_k \cdot k_{\text{ск1}} \cdot k_{y1}$$

Електрорушійна сила катушкової групи

Катушкова група складається з q однакових катушок, розташованих у сусідніх пазах. Якщо катушки виконані з однаковим кроком та мають однакове число витків, то рівні й ЕРС катушок

Діюче значення першої гармонійної ЕРС катушкової групи

$$E_{q1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot q \cdot w_k \cdot k_{\text{ск1}} \cdot k_{p1} \cdot k_{y1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot q \cdot w_k \cdot k_{\text{об1}}$$

де k_{p1} - коефіцієнт розподілу обмотки, характеризує зменшення ЕРС катушкової групи внаслідок розподілу її витків в q окремих пазів

$k_{\text{об1}} = k_{y1} \cdot k_{p1} \cdot k_{\text{ск1}}$ - називають обмотковим коефіцієнтом для першої гармоніки магнітного поля.

Електрорушійна сила фази обмотки

У багатополюсних машинах кожна фаза обмотки складається з ряду катушкових груп, з'єднаних послідовно або паралельно. Якщо в кожній фазі послідовно з'єднане $k = 2p/a$ - катушкових груп, то діюче значення ЕРС фази обмотки:

$$E_{\phi1} = k \cdot E_{q1} = k \cdot 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot q \cdot w_k \cdot k_{\text{об1}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot w_{\phi} \cdot k_{\text{об1}}$$

де

w_{ϕ} - число послідовно з'єднаних витків у фазі обмотки

Поліпшення форми кривої електрорушійної сили.

В обмотці, крім першої гармоніки ЕРС, будуть індукуватися ЕРС від вищих гармонік магнітного поля.

Звичайно потрібно, щоб результуюча крива ЕРС була синусоїдна. Це особливо стосується генераторів, тому що вищі гармоніки ЕРС шкідливо впливають не тільки на генератор і приймач, але і на лінію електропередачі, що приводить до виникнення перенапруг на різних ділянках.

Тому необхідно вживати заходи для зменшення ЕРС від вищих гармонік. Щоб наблизити криву ЕРС до синусоїди, треба, насамперед, створити поле з такою формою кривої, за якої кількість вищих гармонійних в ній була по можливості меншою. Проте одержати цілком прийнятні результати при цьому не вдається.

Тому прагнуть зменшувати вищі гармоніки ЕРС за допомогою відповідної конструкції обмоток. До таких конструктивних заходів належать:

- скорочення кроку обмотки;
- розподіл обмотки по пазках;
- скіс пазів обмотки.

Обмотковий коефіцієнт для вищих гармонік

$$K_{обv} = K_{yv} \cdot K_{pv} \cdot K_{скv}$$

При визначенні коефіцієнта скорочення K_{yv} та коефіцієнта розподілу K_{pv} для вищих гармонік слід мати на увазі, що число полюсів для v -ї гармоніки в v разів більше, ніж для першої. Тому електричні кути зсуву для вищих гармонік ЕРС будуть у v разів більші

$$\alpha_v = \alpha_1 \cdot v.$$

Вибором кроку обмотки можна домогтися знищення будь-якої певної гармоніки.

При скороченні кроку на $1/v$ частину полюсної поділки в кривій ЕРС цілком зникає v - та гармоніка.

При $\beta = y/\tau = 1$ для всіх непарних гармонік коефіцієнт скорочення $K_{yv} = 1$, тобто ЕРС усіх гармонік виявляються повною мірою.

На рис. 8.8 показані напрямки ЕРС у провідниках витка обмотки для $v=5$ при діаметральному й скороченому кроках обмотки.

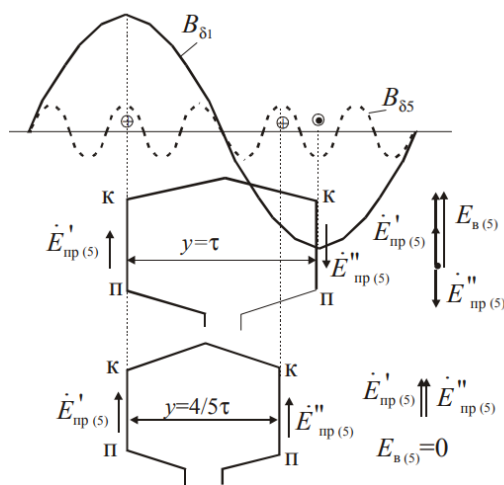


Рисунок 8.8 - Знищення п'ятої гармоніки ЕРС шляхом скорочення кроку обмотки

Досягти одночасного знищення всіх гармонік скороченням кроку обмотки неможливо, тому треба прагнути до ослаблення найбільш сильних гармонік.

При розподілі обмотки $q > 1$ та для багатьох вищих гармонік коефіцієнти розподілу зменшуються $k_{pv} < k_{p1}$, що призводить до значного зменшення ЕРС відповідних гармонік.

У зосереджених обмотках при $q = 1$ для всіх гармонік коефіцієнти розподілу дорівнюють одиниці $k_{pv} = 1$. Чим більше q , тим сильніше зменшуються коефіцієнти розподілу v -х гармонік,

Це пояснюється тим, що v -ті гармонійні складові ЕРС котушок будуть зсунуті одна відносно одної на кути, в v разів більші, ніж перші гармонійні, унаслідок чого геометрична сума v -х гармонійних складових ЕРС зменшиться.

Крива результуючої ЕРС обмотки з великим q ближче до синусоїди. Звичайно вибирають $q = 2 \div 6$.

Проте існує ряд гармонік, для яких не відбувається зменшення їхньої ЕРС шляхом розподілу й скорочення обмотки.

Це гармоніки зубцевого порядку

$$v = v_z = k \cdot \frac{Z_1}{p} \pm 1,$$

де Z_1 – число пазів обмотки статора.

$k = 1, 2, 3$ і т. д.

Зменшення ЕРС вищих гармонік зубцевого порядку можливо здійсненням скошу пазів на роторі в асинхронних машинах та скошу полюсних наконечників у синхронних машинах.

Фізично це пояснюється тим, що при цьому в окремих ділянках провідника індукуються однакові за величиною й протилежні за напрямком ЕРС ΔE .

Найбільш сильними є перші гармоніки зубцевого порядку при $k = 1$.

На практиці звичайно величина скошу дорівнює одному зубцевому діленню статора t_1 , якщо скіс роблять на роторі, й одному зубцевому діленню ротора t_2 , якщо скіс роблять на статорі.

У трифазних обмотках наближенню кривої до синусоїди сприяє також і та обставина, що в трифазних машинах треті $v = 3$ та кратні їм гармонійні ЕРС, індуковані у всіх фазах, збігаються в часі, як у трифазному трансформаторі.

При з'єднанні обмотки статора в зірку (Y) ці гармонійні у всіх фазах мають однаковий напрямок і взаємно компенсуються, унаслідок чого в лінійних напругах вони відсутні.

При з'єднанні обмотки в трикутник (Δ) ЕРС гармонік $v = 3$ додаються, викликаючи струм третьої гармоніки, що циркулює по замкнутому контуру Δ та не виходить у зовнішню мережу. Отже, і в розглянутому випадку лінійні напруги також не містять гармонійних, кратних трьом. Проте щоб уникнути зайвого нагрівання та збільшення втрат, створюваних цими

струмами, у трифазних машинах великої і середньої потужності з'єднання обмоток за схемою Δ не застосовують.

Тому при конструюванні трифазних обмоток необхідно зменшувати вищі гармоніки ЕРС, не кратні трьом.

Обмотки машин змінного струму

Основні елементи та позначення обмоток/

У машинах малої і середньої потужності обмотки статора виконують із круглого ізолюваного проводу. У таких машинах застосовують полузакриті пази овальної або трапецієвидної форми.

У машинах потужністю більш за 100 кВт і напругою вище за 660 В для підвищення електричної і механічної міцності ізоляції обмотки виконують із жорстких секцій, що вкладають у прямокутні пази.

Основним елементом обмотки є виток. Ряд послідовно з'єднаних витків утворює секцію, або котушку. Частини котушок, що розміщуються в пазах статора, називають пазовими або активними, а що розташовуються поза пазом – лобовими (рис. 8.9).

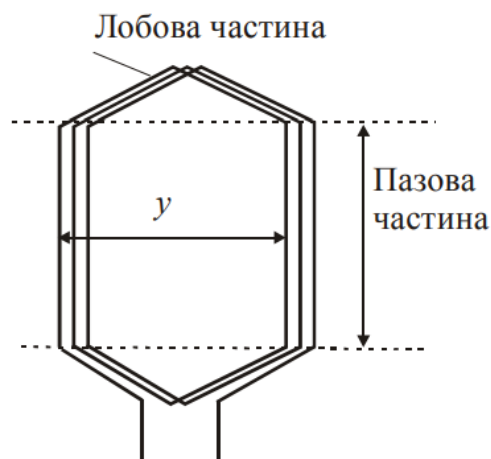


Рисунок 8.9. Котушка обмотки статора

Ширина котушки визначається кроком обмотки – y .

Крок y задається в зубцевих поділках.

Якщо крок обмотки дорівнює полюсній поділці

$$y = \tau = Z_1 / 2p,$$

то обмотку називають обмоткою з діаметральним (або повним) кроком, а якщо $y < \tau$, то з укороченим кроком.

Крок обмотки може бути тільки цілим числом, тому що активні частини котушок повинні обов'язково розташовуватися в пазах.

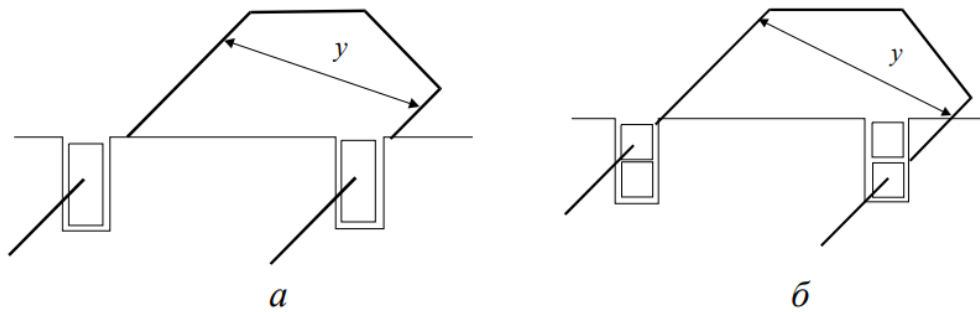
Звичайно $y = (0,8 \div 0,86) \cdot \tau = \text{цч.}$

Відношення $\beta = y/\tau$ називають коефіцієнтом скорочення обмотки.

За розташуванням активних котушкових сторін у пазу обмотки діляться на одношарові, двошарові й одно-двошарові.

Якщо в пазу розміщається тільки одна активна сторона котушки, то обмотка одношарова (рис. 8.10,а), а якщо дві, то двошарова (рис. 8.10,б).

Котушки, які розташовані в сусідніх пазах, з'єднані послідовно та належать до однієї фази, утворюють котушкову групу. В загальному випадку кожна фаза обмотки складається з декількох котушкових груп, з'єднаних послідовно або паралельно.



а - одношарова , б - двошарова

Рисунок 8.10 - Розташування обмоток в пазах секцій

Сторони котушок однієї котушкової групи займають q пазів і утворюють фазну зону з кутом

$$\gamma = \frac{2\pi p q}{Z_1}.$$

Число пазів на полюс і фазу обмотки

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m},$$

де p і m – число пар полюсів і число фаз обмотки.

Число q може бути як цілим, так і дробовим. При $q=1$ під кожним полюсом розташовано по одній котушці кожної фази. Таку обмотку називають зосередженою. При $q>1$ обмотку називають розподіленою.

У більшості трифазних машин виводяться усі початки та кінці фаз, тобто усього шість вивідних кінців. Фази трифазної обмотки можна з'єднати між собою в «трикутник» (умовне позначення Δ) або в «зірку» (умовне позначення Y).

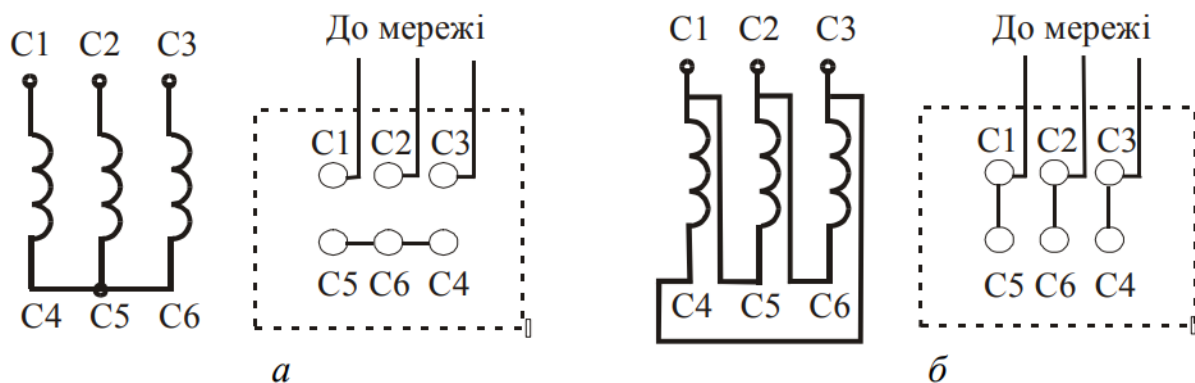


Рисунок 8.11 - Схеми з'єднання фаз трифазної обмотки статора

При з'єднанні в зірку (рис. 8.11,а) на кожну фазу припадає напруга в $\sqrt{3}$ разів менша, ніж напруга мережі.

При з'єднанні в трикутник (рис. 8.11,б) кожна з фаз підключається до повної напруги мережі. Це дозволяє використовувати одну й ту ж схему при двох різних напругах мережі.

Тому номінальна напруга трифазних машин позначається двома цифрами, наприклад 220/380 В або 380/660 В.

У двофазних і однофазних машинах виводяться початки та кінці обох фаз – головної та допоміжної.

Позначення у всіх машинах наносяться безпосередньо на виводи обмоток.

У малих машинах, у яких літерні позначення вивідних кінців ускладнені через відсутність місця, допускається робити кольорові виводи (табл. 8.1).

Таблиця 8.1- Позначення виводів обмоток машин змінного струму

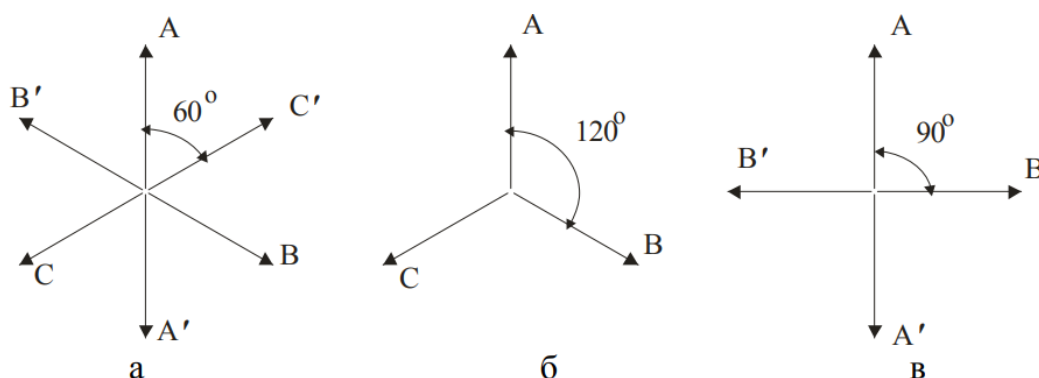
Вид обмотки	Назва виводів	Позначення виводів			
		Літерне		Кольорове	
		початок	кінець	початок	кінець
Трифазна обмотка статора	Перша фаза Друга фаза Третя фаза	C1 C2 C3	C4 C5 C6	Жовтий Зелений Червоний	Жовтий з чорним Зелений з чорним Червоний з чорним
Двофазна обмотка статора	Головна обмотка	C1	C2	Червоний	Червоний з чорним
	Допоміжна обмотка	B1	B2	Синій	Синій з чорним
	Спільна точка	0	-	-	Чорний
Обмотка фазного ротора АМ	Перша фаза Друга фаза Третя фаза Нульова точка	P1 P2 P3 0	—	—	—

Формування обмоток за допомогою числових рядів

Числовим рядом обмотки називається послідовність чисел, що визначають розподіл її елементів (катушок, катушкових груп) за фазами та полюсами. Фазна зона трифазних обмоток ($m = 3$) звичайно займає дугу кола статора, що дорівнює 60 ел град.

Такі обмотки називають шестизонними. Чергування фаз у сусідніх фазних зонах визначається послідовністю А, С', В, А', С, В' відповідно до

векторної діаграми результируючих ЕРС котушок фазних зон обмотки (рис. 8.12,а).



а – трифазні шестизонні; б – трифазні тризонні; в – двофазні

Рисунок 8.12. Векторні діаграми результируючих ЕРС фазних зон обмотки

У шестизонних обмотках число пазів на полюс і фазу визначається за виразом

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m}.$$

Ця величина визначає також число котушок у котушковій групі. При цілому числі q всі котушкові групи однакові та містять однакове число котушок. Числовий ряд обмотки складається з однакових цифр, що дорівнюють q . Число членів числового ряду дорівнює $2p \cdot m$.

При дробовому числі q котушкові групи утримують різне число котушок і числовий ряд складається з ряду різних цифр залежно від величини дробу.

У ряді випадків застосовують обмотки, у яких фазна зона займає дугу

$$2\tau/m = \pi/3 = 120 \text{ ел град.}$$

Такі обмотки називають тризонними. Послідовність фаз у сусідніх фазних зонах визначається: А, В, С (рис. 8.12,б). У тризонних обмотках число пазів на полюс і фазу визначається за виразом

$$q = \frac{Z_1}{p \cdot m}.$$

Для трифазних двигунів найвигіднішими є шестизонні обмотки, тому що при однаковому числі пазів у машині ефективне число витків у фазі такої обмотки збільшується у 1,15 раза порівняно з тризонною обмоткою.

У двофазних обмотках ($m = 2$) послідовність фаз у сусідніх фазних зонах визначається: А, В, А', В' (рис. 8.12,в).

Формування розподілів активних котушкових сторін (АКС) обмотки за допомогою числових рядів слід здійснювати в такій послідовності:

- за заданими значеннями Z_1 , p та m визначають число пазів на полюс і фазу q ;
- записують числовий ряд обмотки, що складається з $2pm$ однакових цифр, що дорівнюють q при цілому його числі;

- під кожною цифрою числового ряду вказують фазу відповідно до послідовності чергування фазних зон.

Приклад.

Розглянемо формування шестизонної трифазної обмотки $m = 3$ із числом полюсів $2p = 2$ у числі пазів статора $Z_1 = 12$:

число пазів на полюс і фазу: $q = Z_1 / 2pm = 12 / (2 \cdot 3) = 2$;

числовий ряд: 2, 2, 2, 2, 2, 2;

послідовність фаз: A, C', B, A', C, B'.

Розподіл активних котушкових сторін (АКС) обмотки по пазах і фазних зонах зобразимо у вигляді табл. 25.2, де кожній фазній зоні належить по два пази відповідно до числового ряду. Номери АКС збігаються з номерами пазів.

Таблиця 8.2 - Розподіл пазів по фазних зонах ($Z_1 = 12$, $2p = 2$, $m = 3$)

Номери АКС (номери Z_1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Фазна зона	A		C'		B		A'		C		B'	

Для наочності зображення поверхню статора разом із пазами й обмоткою розгортають у площину. Провідники, що лежать в одному пази, зображують у вигляді прямих ліній. На рис. 25.5 відповідно до табл. 25.2 зображені в розгорнутому вигляді лінії пазів, написані їхні номери та розмічені фазні зони. Всі пази розділені на дві частини, тому що $2^p = 2$ і полюсна поділлка дорівнює

$$\tau = Z_1 / 2p = 12 / 2 = 6.$$

Полярності полюсів сусідніх полюсних поділок протилежні. Стрілками показані напрямки миттєвих значень ЕРС або струмів. Напрямки стрілок у межах одної полюсної поділки τ на всіх пазових лініях однакові та змінюються при переході до наступної полюсної поділки.

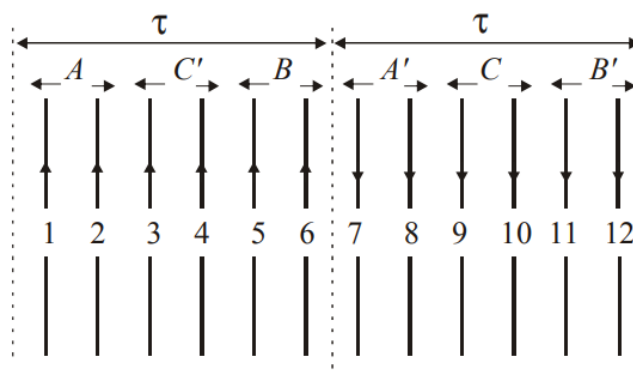


Рисунок 8.13 - Розподіл пазів по фазних зонах ($Z_1 = 12$, $2p = 2$)

На кожній полюсній поділці розташовується однакова кількість АКС усіх трьох фаз.

Цей розподіл струмів в активних частинах обмотки характерний для одношарових обмоток, хоча обмотка може бути виконана і двошаровою.

На рис. 8.14 зображена векторна діаграма пазових ЕРС обмотки, на котрій також відзначені фазні зони. Кут зсуву між ЕРС сусідніх пазів визначається за виразом

$$\alpha_1 = 360 \cdot p / Z_1 = 360 / 12 = 30 \text{ елград.}$$

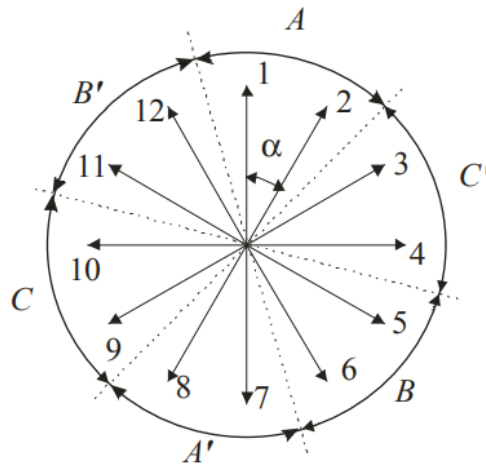


Рисунок 8.14 - Векторна діаграма пазових ЕРС ($Z_1 = 12$, $2p = 2$)

При виконанні обмотки провідники (АКС), що лежать у різних пазах, з'єднують між собою в катушки та катушкові групи так, щоб індуковані в них ЕРС додавалися.

Дані табл. 8.2 та векторної діаграми рис. 8.15 дозволяють зобразити схему з'єднання АКС обмотки в межах кожної фази (рис. 8.7).

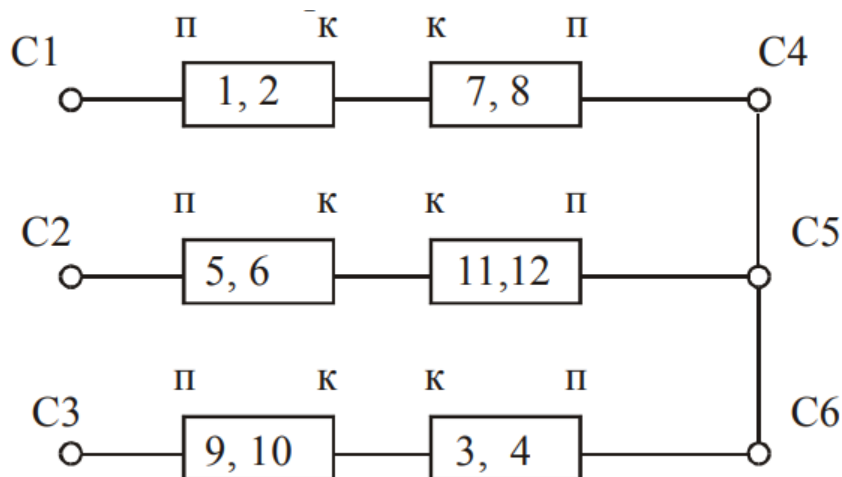


Рисунок 8.15 - Схема з'єднання АКС обмотки ($Z_1 = 12$, $2p = 2$)

При цьому необхідно пам'ятати, що на прямих ЕРС для фазних зон із штриха ми має зсув 180° (рис. 8.14).

Для того щоб ЕРС у межах кожної фази додавалися, необхідно поміняти напрямки вмикання АКС, що знаходяться у фазних зонах із штрихами.

Таким чином, у фазу А входять АКС із номерами: 1, 2, -7, -8;

у фазу В: 5, 6, -11, -12;

у фазу С: 9, 10, -3, -4,

де знак «-» означає зустрічне з'єднання АКС обмотки.

Схема з'єднання АКС для даної обмотки показана на рис. 8.15.

На цій схемі АКС, що належать до одної фазної зони, показані прямокутниками з умовним позначенням їхніх початків (п) та кінців (к).

У середині прямокутників записані номери АКС.

Активні котушкові сторони обмотки, які розташовані на відстані t в межах однієї фази, можна об'єднати в котушки та котушкові групи одношарової обмотки.

Від того, у який спосіб з'єднані АКС у лобових частинах, залежить конструкція одношарових обмоток.

Одношарові обмотки.

Одношарові обмотки найбільш придатні для механізованої укладки. Проте застосування їх призводить до збільшеної витрати обмоткового проводу через значну довжину лобових частин. Крім того, у таких обмотках не є можливим виконати скорочення кроку, що призводить до погіршення форми магнітного поля в повітряному зазорі, збільшення додаткових втрат, виникнення провалів у механічній характеристиці і підвищенню шуму. Частіш за все використовуються концентричні та шаблонні обмотки. Одношарові обмотки однакові в електричному та магнітному відношенні і різняться тільки за формою лобових частин котушок.

Одношарові концентричні обмотки.

Концентричні обмотки підрозділяються на двоплощинні та триплощинні. Котушки кожної котушкової групи охоплюють одна одну, тобто є концентричними. Кількість груп у кожній фазі дорівнює числу пар полюсів обмотки p .

Котушки, що утворюють кожну котушкову групу, мають різну ширину (крок), тому що більші котушки охоплюють менші. Пересічні лобові частини обмотки необхідно розташовувати в різних площинах.

У двоплощинній обмотці доводиться виготовляти котушкові групи двоякої форми, що умовно можна назвати «малими» та «великими» (рис. 8.16).

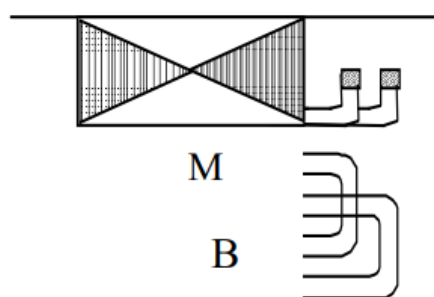


Рисунок 8.16 - Розташування лобових частин котушок двоплощинної концентричної обмотки ($q = 2$)

При парному числі пар полюсів ($p = 2, 4, 6$ і т.і.) половина котушкових груп має довгі лобові частини, що розташовуються в одній площині, а друга половина – короткі лобові частини, що розташовуються в другій площині.

При непарному числі пар полюсів обмотка кожної фази утримує непарне число котушкових груп. У цьому випадку (крім $p = 1$) одну з котушкових груп роблять вигнутою, тобто її сторони мають різну довжину та лежать в різних площинах. Таку котушкову групу називають «кривою».

Котушкові групи з'єднані між собою послідовно, створюючи фази обмотки. Для того щоб активні й індуктивні опори фаз обмотки були однакові, кожна фаза повинна мати однакове число великих та малих котушок.

Одношарові шаблонні обмотки.

Шаблонні обмотки мають котушки однакової ширини та форми, що намотуються на одному шаблоні. Для зручності укладки котушки шаблонних обмоток мають форму трапеції.

Шаблонні обмотки підрозділяються на такі типи:

- проста шаблонна обмотка;
- шаблонна обмотка «врозвал»;
- ланцюгова обмотка.

Схема - розгортка простої шаблонної обмотки виконана на рис. 8.17 для прикладу ($Z_1 = 12, 2p = 2$).

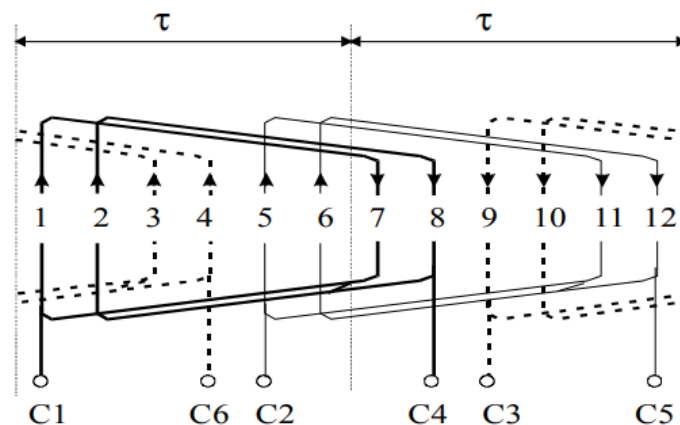


Рисунок 8.17. Схема-розгортка простої шаблонної обмотки ($Z_1 = 12, 2p = 2$)

У цій обмотці лобові частини всієї котушкової групи при виході з пазів відгинаються в один бік і крок обмотки є повним ($y = \tau = 6$).

У шаблонної обмотки «врозвал» котушкова група при виході з пазів поділяється на дві половини, лобові частини яких відігнуті в різні боки. При цьому q повинно бути парним числом. У різні боки відгинають половину ($q/2$) котушок котушкової групи.

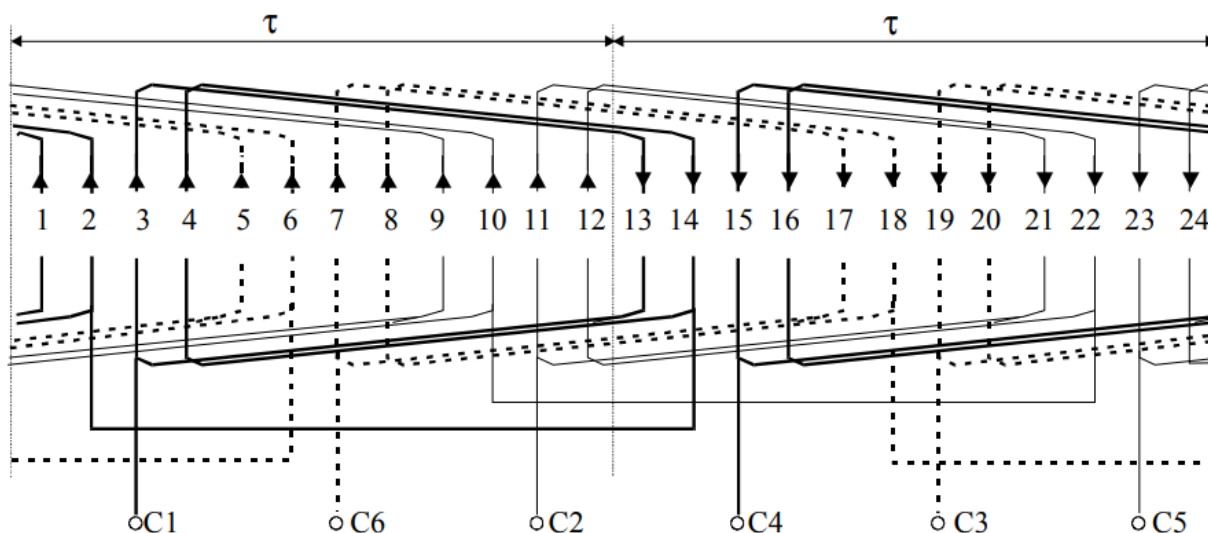


Рисунок 8.18. Схема-розгортка шаблонової одношарової обмотки «врозвал» ($Z_1 = 24$, $2p = 2$, $m = 3$)

При непарному кроці «у» обмотка виконується з розвалом кожної секції. Таку обмотку називають ланцюговою.

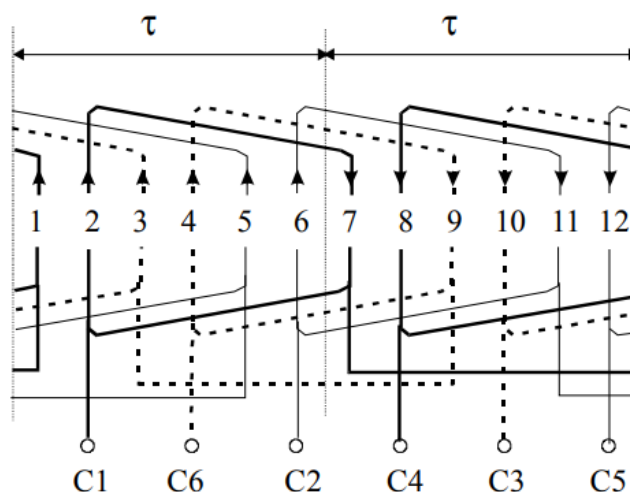


Рисунок 8.19 - Схема-розгортка ланцюгової обмотки ($Z_1 = 12$, $2p = 2$, $q = 2$)

Ланцюгова обмотка може бути виконана як при парному, так і при непарному q . Причому крок по пазах повинен бути непарним, тому що одна сторона кожної котушки лежить у парному пази, інша – у непарному.

Крок котушок, що входять у котушкову групу, зменшився до $y = 5$.

Але в електромагнітному відношенні ця обмотка еквівалентна обмотці з повним кроком.

Крок котушок ланцюгової обмотки може дорівнювати полюсній поділі τ тільки при непарному q . Шаблонові обмотки можна виконувати з числом паралельних гілок $a = p$, а ланцюгові обмотки з парним q – з $a = 2p$.

Концентричні обмотки також допускають утворення $a = p$ паралельних гілок. Проте активні й індуктивні опори гілок будуть розрізнятися за величиною в зв'язку з неоднаковими довжинами котушок і особливо у

зв'язку з різним положенням їхніх лобових частин відносно осердя. Тому може виникнути неоднакове навантаження гілок і з'явитися зрівняльний струм.

Головна перевага концентричних обмоток – це можливість застосування верстатної (механізованої) укладки, що обумовило їхнє використання в АД потужністю до 20 кВт.

Недолік – наявність котушок різних розмірів, що ускладнює ручне виготовлення. Цій недолік усувається в шаблонних обмотках. Недолік одношарових обмоток полягає ще й в тому, що скорочення кроку в цих обмотках впливає тільки на витрату міді, але не впливає на криву розподілу МРС (розподіл фазних зон залишається незмінним, крім деяких шаблонних обмоток), тобто її робочі властивості не поліпшуються.

Двошарові обмотки

Двошарові обмотки з цілим q

Застосування двошарових обмоток обумовлено:

- прагненням до підвищення продуктивності праці, спрощення технології внаслідок однакового розміру секцій;
- можливістю їхнього виготовлення з укороченим кроком, що важливо для одержання синусоїдальної ЕРС;
- одержання економії матеріалу обмоток.

У двошарових обмотках одна сторона секції (верхня) розташовується у верхньому шарі паза (рис. 8.10,б), інша (нижня) – у нижньому шарі паза, розташованого на відстані кроку (y) обмотки. Скорочення кроку двошарової обмотки $\beta = y / \tau$ знаходиться в діапазоні $\beta = (0,8 \dots 0,85) \cdot \tau$.

Двошарові обмотки з дробовим q .

У потужних багатополюсних синхронних генераторах практично неможливо виконати обмотку з цілим q , тому що при цьому треба мати велике число пазів на статорі. В асинхронних машинах такі обмотки застосовуються, коли при виготовленні пластин осердя двигунів із різноманітним числом полюсів використовується один штамп.

Обмотки з дробовим q можуть бути з'єднані в симетричні схеми. Для цього їхні котушкові групи (великі та малі) формують не з однакового числа котушок, що дорівнює числу q , а з різного. Причому число котушок у великих та малих котушкових групах відрізняється на одиницю.

Послідовність великих та малих котушкових груп повторюється (період повторення числового ряду). Послідовність великих та малих котушкових груп у періоді повторення записується рядом цифр, тобто спочатку складається числовий ряд періоду повторення, а потім повний числовий ряд для всієї обмотки. Кожна цифра числового ряду дорівнює числу котушок у наступній котушковій групі, а сукупна сума цифр дорівнює числу всіх котушок обмотки.

Для упорядкування числового ряду обмотки дробове число q записують у вигляді неправильного дробу

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = A \frac{c}{d} = \frac{A \cdot d + c}{d},$$

де A – ціла частина числа q ; c – чисельник; d – знаменник дробової частини числа q ; $(A \cdot d + c)$ – чисельник неправильного дробу.

Число пазів у періоді повторення числового ряду дорівнює

$$Z_{\text{повт}} = Ad + c.$$

У кожному періоді повторення міститься d катушкових груп, із яких число великих дорівнює $N_6 = c$, а число малих $N_m = d - c$.

Кількість катушок у великих катушкових групах дорівнює $A + 1$.

Кількість катушок у малих катушкових групах дорівнює A .

Числовий ряд обмотки складається з $N_6 = c$ катушкових груп по $(A + 1)$ секцій та $N_m = (d - c)$ катушкових груп по A секцій.

Таким чином, справедливі такі рівності:

$$N_6 \cdot (A + 1) + N_m \cdot A = Ad + c;$$

$$N_6 + N_m = d.$$

Число періодів повторення числового ряду

$$N = \frac{Z_1}{A \cdot d + c}.$$

Одно-двошарові обмотки

Одно-двошарові обмотки за розподілом АКС еквівалентні двошаровим обмоткам з укороченим кроком. Застосування одно-двошарових обмоток у порівнянні з одношаровими дозволяє значно поліпшити форму кривої МРС. У одно-двошарових обмотках у пазах, у яких розміщені сторони катушок однієї і тієї ж фази, поміщають одношарову катушку з подвійним числом витків (велика катушка), а в інших пазах – у двох шарах сторони катушок різних фаз із половинним числом витків (малі катушки).

Одно-двошарову обмотку виконують із концентричних катушок. Тому укладання в пази одно-двошарової обмотки можна механізувати.

Кількість катушок у концентричній катушковій групі залежить від кроку двошарової обмотки і числа q .

Одно-двошарові обмотки мають переваги як двошарових, так і одношарових обмоток. Одношарові обмотки укладаються в пази без підйому кроку, і тому їхня укладка може бути механізована. Застосування одно-двошарових обмоток, виконаних із концентричних катушок, також дозволяє механізувати процес укладання.

Двофазні обмотки

У статори однофазних двигунів вкладають дві однофазні обмотки. Одна з них – головна, або робоча, друга – допоміжна, або пускова. Обмотки розташовують по пазах статора так, що їхні осі зсунуті одна відносно одної в просторі на кут 90 електричних градусів.

В однофазних конденсаторних двигунах обидві обмотки займають по половині пазів та за своїм розподілом еквівалентні двофазним

обмоткам із послідовністю фаз у сусідніх фазних зонах А, В, А', В'. Число пазів на полюс і фазу двофазної обмотки

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{Z_1}{4p},$$

де $m = 2$ – число фаз двофазної обмотки.

Формування схем двофазних обмоток також здійснюють за допомогою числових рядів.

Однофазні обмотки

В однофазних ($m = 1$) АД виконується дві обмотки зсунуті в просторі на 90 ел. град: робоча, що займає $2/3$ пазів та пускова – $1/3$ пазів статора. Число пазів на полюс і фазу робочої (p) та пускової (p) обмоток

$$q_p = \frac{Z_1 \cdot 2}{2pm \cdot 3} = \frac{Z_1}{3p},$$
$$q_{\pi} = \frac{Z_1 \cdot 1}{2pm \cdot 3} = \frac{Z_1}{6p},$$

Числовий ряд такої обмотки утвориться чергуванням чисел q_p і q_{π} .

Магніторушійна сила обмоток машин змінного струму

При проходженні струму по обмотці утворюється магніторушійна сила (МРС). Значення і просторовий розподіл МРС залежить від будови обмотки та струмів, що протікають по ній.

При аналізі МРС обмоток приймемо такі допущення:

- магнітна проникність сталі осердь $\mu_{ст} = \infty$;
- пази та явні полюси відсутні та повітряний зазор є рівномірним;
- величина повітряного зазора мала порівняно з радіусом статора та полюсною поділкою;
- магнітне поле створюється нескінченно тонкими та нескінченно довгими провідниками.

При цих допущеннях лінії магнітної індукції в повітряному зазорі прямолінійні та перпендикулярні поверхні зазора.

МРС фази обмотки являє собою суму основної та вищих просторових гармонійних МРС із незмінним розташуванням у просторі та пульсуючих у часі.

Амплітуда основної гармонійної МРС окремої котушки розташована по осі відповідної котушки, а амплітуда основної гармонійної складової фази обмотки розташована по осі фази.

Амплітуда гармонійної складової зворотно пропорційна її порядку та пропорційна обмотковому коефіцієнту для даної гармоніки;

Розподіл та скорочення кроку обмотки впливають на форму кривої МРС й наближає її до синусоїди.

Магніторушійна сила трифазної обмотки статора

При вмиканні трифазної обмотки в мережу трифазного струму у фазних обмотках з'являються струми, зсунуті за фазою в часі один відносно одного на 120 електричних градусів.

Основна гармонійна складова результуючої МРС симетричної трифазної обмотки являє собою вже не пульсуючу в просторі хвилю, як для однієї фази обмотки, а хвилю, що біжить праворуч (26.24), по колу статора.

Сума хвиль, що біжить ліворуч, дорівнює нулю.

На відміну від пульсуючої хвилі максимальне значення хвилі, що біжить, не приймає нульове значення ні в який момент часу протягом усього просторового періоду.

У загальному випадку МРС фази обмотки являє собою суму основної та вищих просторових гармонік з незмінним розташуванням у просторі.

МРС фаз вищих гармонік також необхідно розкласти на хвилі МРС, що обертаються в протилежні сторони, а потім визначити результуючі МРС вищих гармонік для трифазної обмотки.

Таким чином, МРС трифазної обмотки при симетричному навантаженні не містить гармонійних складових, кратних трьом, та складається з прямих гармонік порядку $v = 6k + 1$ і зворотних гармонік порядку $v = 6k - 1$.

Перша гармоніка МРС є прямою та обертається в напрямку чергування фаз. Для зміни напрямку обертання слід змінити порядок чергування фаз.

Всі просторові гармоніки МРС у симетричній трифазній обмотці обертів та мають одну складову – пряму або зворотну.

Магніторушійна сила двофазної обмотки

У симетричній двофазній обмотці осі фаз А-А' та В-В' зсунуті в просторі на 90 електричних градусів. При вмиканні такої обмотки в симетричну двофазну мережу струм у фазних обмотках має однакову амплітуду та зсунутий за фазою на чверть періоду 90 градусів.

Струм кожної фазної обмотки створює пульсуючу МРС.

При додаванні зворотних хвиль сума МРС буде дорівнювати нулю, тому що вони являють собою синусоїди з рівними амплітудами, зсунутими на 180 електричних градусів.

Частота обертання магнітного поля, утвореного двофазною обмоткою, визначається так само, як і для поля, утвореного трифазною обмоткою.

Побудова кривої розподілу магніторушійної сили

Побудуємо криву МРС двошарової обмотки з $q = 2$, $m = 3$, $2p = 2$, $Z_1 = 12$, $\tau = z/2p = 6$. Крок обмотки приймемо за $y = 5$.

З урахуванням вхідних даних збудована таблиця розподілу АКС обмотки (рис. 8.8) та дві криві МРС для різних моментів часу. Перша для моменту часу, коли струми котушок (рис. 8.19)

$$i_A = I_m, \quad i_{A'} = -I_m, \quad i_B = i_C = -0,5I_m, \quad i_{B'} = i_{C'} = 0,5I_m.$$

Друга для струмів (рис. 26.8,б)

$$i_A = i_{C'} = 0,866I_m, \quad i_{A'} = i_C = -0,866I_m, \quad i_B = i_{B'} = 0.$$

При зміні фази струму на деякий кут крива МРС та її основна гармоніка зміщуються на такий самий кут.

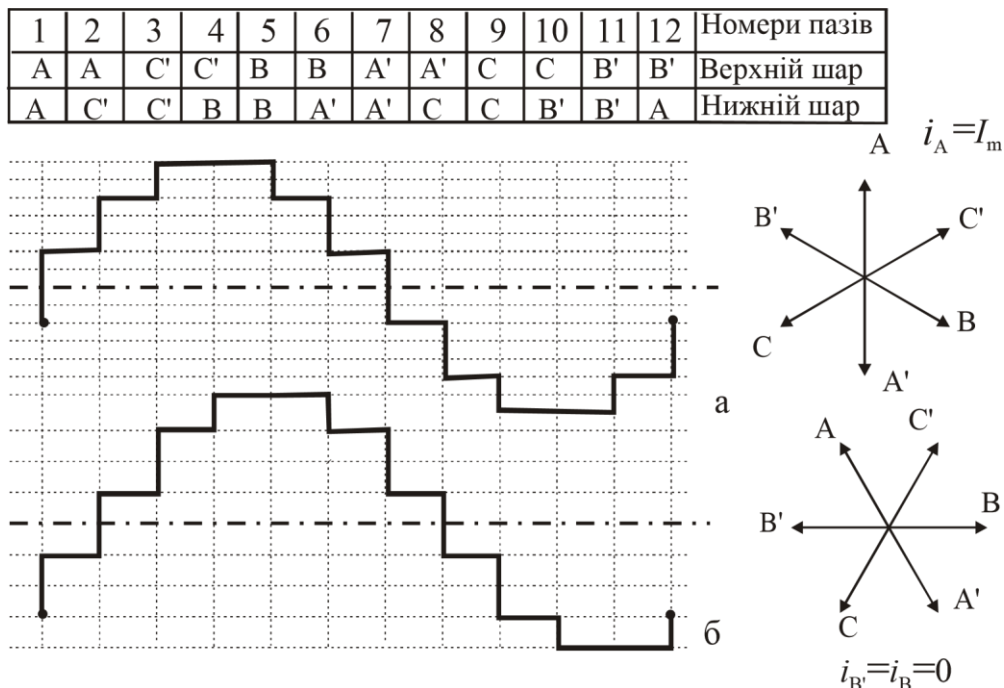


Рисунок 8.20 - Побудова кривої МРС трифазної двошарової обмотки

Отриману криву МРС розділяють віссю абсцис таким чином, щоб сума площин додатних півхвиль дорівнювала сумі площин від'ємних півхвиль (полюсів). При цілому q усі півхвилі МРС мають однакову форму. При збільшенні числа пазів на полюс і фазу q кількість ступенів в хвилі МРС збільшується та форма її наближається до синусоїди.

Кругове, еліптичне та пульсуюче магнітні поля

МРС трифазної обмотки створює в зазорі обертові магнітні поля. Частота обертання v -ї гармоніки магнітного поля в v разів менша від частоти обертання поля основної гармоніки $n_v = n_1 / v$.

У загальному випадку обертові магнітні поля v -х гармонік, створені обмоткою статора, можуть бути круговими або еліптичними.

Кругове поле характеризується тим, що просторовий вектор МРС цього поля обертається рівномірно та своїм кінцем описує коло, тобто значення вектора МРС у будь-якому його просторовому положенні залишається незмінним.

Кругове обертове магнітне поле v -ї гармоніки, створене трифазною обмоткою статора, утворюється при виконанні таких умов:

- МРС трьох фаз тобто дорівнюють струми фаз $I_{A\phi} = I_{B\phi} = I_{C\phi}$; обмоткові коефіцієнти фаз $K_{об Av} = K_{об Bv} = K_{об Cv}$; числа витків у фазах обмотки $w_A = w_B = w_C$;
- МРС фаз повинні бути зсунуті в просторі на 120 електричних граду-

сів;

- МРС повинні бути зсунуті в часі на 120 електричних градусів.

Кругове обертове поле можна дістати і за допомогою симетричної двофазної обмотки статора. Для цього повинні бути виконані такі умови:

- МРС двох фаз рівні $F_{A1} = F_{B1} = 0,9 I_{\phi} \cdot w_{\phi} \cdot K_{об1} / p$;
- МРС фаз повинні бути зсунуті в просторі на 90 електричних градусів;
- МРС повинні бути зсунуті в часі на 90 електричних градусів.

Якщо якась з перерахованих вище умов для v -ї гармоніки трифазної або двофазної обмоток не виконується, магнітне поле даної гармоніки буде еліптичним.

Наприклад, поле буде еліптичним, якщо обмотку статора ввімкнути в мережу з несиметричною напругою або якщо обмотка статора несиметрична. Просторовий вектор МРС еліптичного поля в різні моменти часу не залишається постійним і при обертанні своїм кінцем описує еліпс рис.8.20

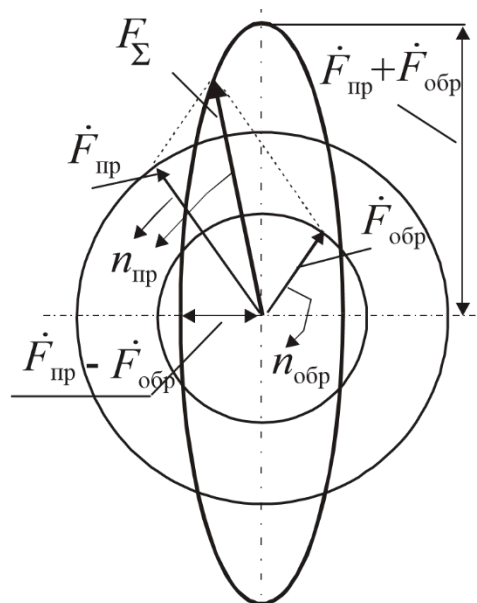


Рисунок 8.21 - Утворення еліптичного обертового поля

Еліптичне магнітне поле може бути розкладене на два обертові у протилежні боки з однаковою частотою обертання ($n_{пр} = -n_{обр}$) кругові магнітні поля.

Якщо пряма й зворотна складові магнітного поля дорівнюють за величиною, то результуюче поле стає пульсуючим.

Пульсуюче поле (як було розглянуто раніше) створює однофазна обмотка, ввімкнена в мережу змінного струму.

Висновки.

1. Електричні машини змінного струму поділяються на асинхронні, синхронні та колекторні. В основі їхньої роботи лежить принцип обертового магнітного поля, яке створюється трифазною або двофазною обмоткою статора. Частота обертання магнітного поля визначається частотою мережі та числом полюсів.
2. Структура магнітних полів і ЕРС суттєво залежить від конструкції обмотки статора й ротора. Просторовий розподіл магнітної індукції містить основну та вищі гармоніки, що впливають на форму ЕРС. Для зменшення шкідливих гармонік застосовують скорочений крок, розподілені обмотки, скіс пазів та оптимальні схеми з'єднання фаз.
3. Обертове магнітне поле утворюється за рахунок зсунутого у часі та просторі струму фаз. У трифазних обмотках створюється кругове поле; у разі порушення симетрії може виникати еліптичне або пульсуюче поле.
4. ЕРС у провідниках, витках, котушках та котушкових групах розраховується з урахуванням коефіцієнтів скорочення кроку, розподілу та скосу. Основна гармоніка формує корисну ЕРС; вищі гармоніки підлягають пригніченню.
5. Види обмоток (одношарові, двошарові, одно-двошарові) визначають електромагнітні властивості машини та технологічні особливості виготовлення. Двошарові обмотки надають кращу синусоїдальність МРС та дозволяють економити матеріал.
6. Магніторушійна сила (МРС) характеризує здатність обмотки створювати магнітне поле. Форма МРС залежить від типу обмотки та схеми живлення. У трифазних машинах основна МРС утворює рівномірне обертове поле, вищі гармоніки мають прямі та зворотні складові.
7. Специфіка однофазних та двофазних обмоток полягає у необхідності створення фазового зсуву для утворення пускового моменту та імітації багатофазної системи.

Контрольні питання.

1. Які основні види електричних машин змінного струму та їхні конструктивні особливості?
2. У чому полягає принцип створення обертового магнітного поля в трифазній обмотці?
3. Як частота обертання магнітного поля залежить від числа полюсів та частоти живлення?
4. Що таке просторові гармоніки та як вони впливають на форму ЕРС?
5. Які методи застосовуються для зменшення вищих гармонік?
6. Як визначається ЕРС у провіднику, витку та котушці?
7. Які конструктивні особливості мають одношарові та двошарові обмотки?
8. Що таке крок обмотки та коефіцієнт його скорочення?

9. У яких випадках застосовується скіс пазів і який ефект він має?
10. Які умови формування кругового магнітного поля у трифазних і двофазних обмотках?
11. Чому в схемі з'єднання «зірка» гармоніки кратні трьом компенсуються?
12. Як формується розподіл активних котушкових сторін за допомогою числових рядів?
13. Які переваги та недоліки мають одношарові обмотки?
14. У чому полягає принцип формування МРС фази обмотки?
15. Які відмінності між круговим, еліптичним та пульсуючим магнітними полями?
16. Як визначається частота обертання гармонік МРС?
17. Які особливості конструкції двофазних та однофазних обмоток?
18. Які фактори впливають на синусоїдальність МРС?
19. Що таке обмотковий коефіцієнт і які складові він містить?
20. Як впливає дробовий q на структуру обмотки?

Використана література.

1. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
2. Гайденок Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
3. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
4. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331с.

ТЕМА 9. КОНСТРУКЦІЯ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

Улаштування та режими роботи асинхронної машини. Конструкція асинхронного двигуна. Основні рівняння та параметри. МРС і струми асинхронного двигуна. Розрахунок магнітного кола. Робота асинхронної машини в різних режимах. Висновки.

Конструкція та принцип дії АМ

Асинхронною називається двообмоткова електрична машина змінного струму, у котрій одна обмотка (первинна) одержує живлення від електричної мережі з постійною частотою f_1 , а вторинна замикається накоротко або на електричний опір.

На долю асинхронних двигунів (АД) припадає до 90% усіх електродвигунів, що випускаються. Широке їхнє поширення обумовлено простотою конструкції, надійністю в роботі, добрими експлуатаційними властивостями, невисокою вартістю та простотою обслуговування. Галузі застосування АД досить широкі – від побутових електроприладів до великих верстатів і агрегатів, підйомних пристроїв, транспортних засобів і т. п. Відповідно до цього одинична потужність АД становить від часток вата до тисяч кіловат.

Широкому використанню АД в сучасному електроприводі сприяє розробка електронних устроїв, що дозволяють розширити регульовальні властивості двигунів.

До недоліків АД слід віднести споживання з мережі реактивного струму, необхідного для створення магнітного потоку.

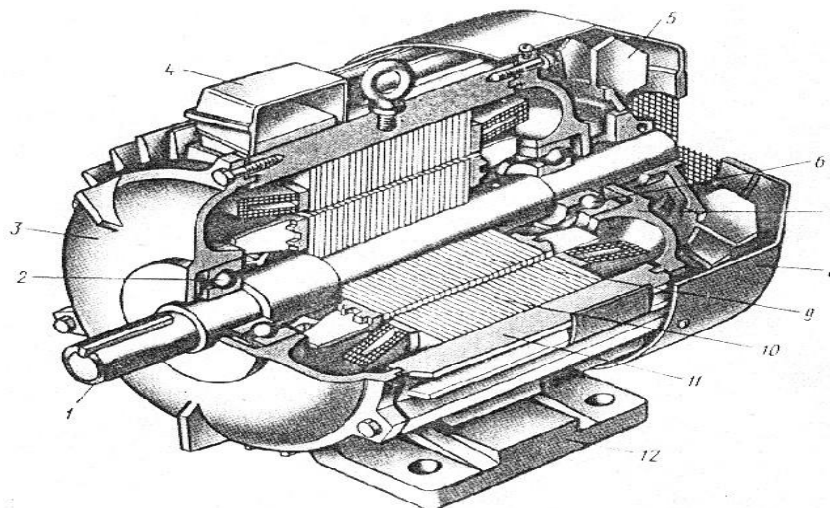
АД мають відносно високі ККД і $\cos\varphi$. При потужностях більш за 1кВт: $\eta = 0,7 \div 0,95$, $\cos\varphi = 0,7 \div 0,9$.

Трифазні, двофазні, однофазні АД випускаються таких модифікацій:

- з підвищеним пусковим моментом;
- з підвищеним ковзанням;
- багатошвидкісні двигуни;
- на частоту 50/60 Гц;
- малошумні;
- вбудовані;
- з вмонтованим температурним захистом;
- для роботи від тиристорних перетворювачів;
- тропічного, волого-морозостійкого виконання; • стійкого до хімічно агресивних середовищ; • вибухозахищеного виконання.

Конструкція АД

Існують два основних типи асинхронних двигунів: двигуни з короткозамкненим ротором (рис. 9.1) та двигуни з контактними кільцями з фазним ротором (рис. 9.7). Основні частини АД: нерухома частина – статор і рухлива частина – ротор, розділені повітряним зазором $\delta = 0,1$ мм у двигунах малої потужності й $\delta = 1 \div 1,5$ мм у двигунах великої потужності.



1 – вал; 2, 6 – підшипники; 3, 7 – підшипникові щити; 4 – коробка виводів; 5 – вентилятор; 8 – кожух вентилятора; 9 – осердя ротора з короткозамкненою обмоткою; 10 – осердя статора з обмоткою; 11 – корпус; 12 – лапи
Рисунок 9.1 - Двигун із короткозамкненим ротором.

Обидва типи двигунів мають однакову конструкцію статора і розрізняються за будовою ротора. Асинхронний двигун складається зі станини (корпусу), що повинен мати достатню механічну міцність, та виконується з чавуну або алюмінію. За допомогою лап двигун кріпиться до фундаменту або до елементів виробничого механізму. Існують також інші засоби кріплення двигуна до виробничого механізму.

Вал двигуна обертається в підшипниках кочення. Підшипники із зовнішньої та внутрішньої сторін закриті кришками.

Конструкція оболонки (корпус, щити та ін.) залежить від виконання машини за ступенем захищеності та від системи охолодження.

Для поліпшення охолодження двигуна на його валу укріплений відцентровий вентилятор, що обдуває ребристий корпус машини (рис. 9.1). Вентилятор закритий кожухом.

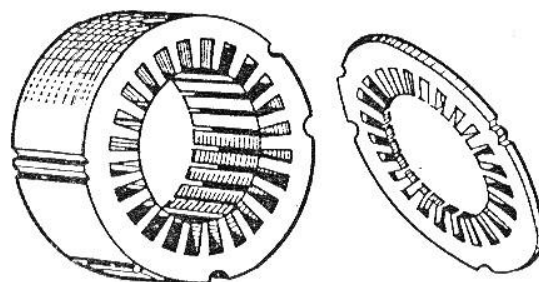


Рисунок 9.2 - Осердя статора та штампований лист

У внутрішній розточці станини кріпиться осердя статора (рис. 9.2), скріплене скобами та запресоване у станину. Положення осердя фіксується штифтами, що перешкоджають його зсуву в аксіальному напрямку.

Для зменшення магнітних втрат осердя статора збирають з окремих, ізольованих термостійким покриттям листів (завтовшки 0,5 або 0,35 мм) електротехнічної сталі (рис. 9.2). Для осердя АД застосовують холоднокатані ізотропні електротехнічні сталі марок 2013, 2312, 2411 та ін.

У пази магнітопроводу статора укладається обмотка з ізольованого мідного проводу круглого або прямокутного перетину. Обмотку з круглого проводу вкладають (усипають) у напівзакриті пази через шліц у пазу (рис. 9.3).

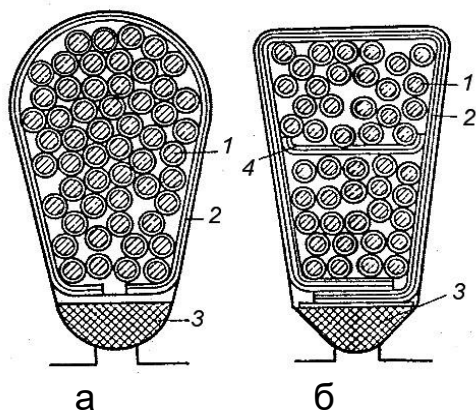
Обмотки з прямокутного проводу виготовляють у вигляді жорстких секцій та вкладають у відкриті (рис. 9.4 ,а) або напіввідкриті (рис. 9.4 ,б) пази.

У сучасних АД використовують електроізоляційні матеріали класів нагрівостійкості *B* та *F*, а для спеціальних машин, що працюють у важких умовах, – класу *H*. У машинах розрізняють міжвиткову та корпусну ізоляції.

Міжвиткова ізоляція (між витками обмотки) забезпечується ізоляцією самого провідника, яка наноситься на нього в процесі виготовлення.

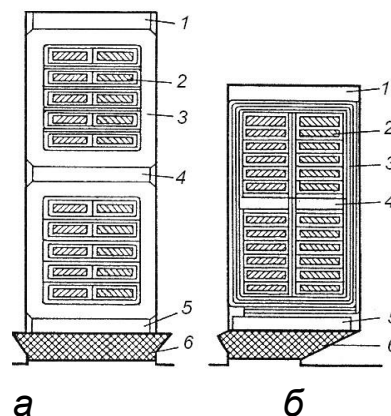
Корпусна ізоляція відокремлює провідники обмотки від корпусу електричної машини. Для неї використовують різноманітні прокладки, гільзи або ряд прошарків ізоляції.

Трифазна обмотка статора може бути з'єднана за схемою «зірка» – (Y) або «трикутник» – (Δ). Початки фаз обмоток на схемах позначаються буквами C1, C2, C3, кінці C4, C5, C6.



1 – провідник; 2 – корпусна ізоляція; 3 – клин; 4 – міжшарова прокладка

Рисунок 9.3 - Пази статора для всипних одношарової – а та двошарової – б обмоток:



1,4,5 – ізоляційні прокладки; 2 – провідник; 3 – корпусна ізоляція котушки; 6 – клин

Рисунок 9.4 - Відкритий – а і напіввідкритий – б пази статора для обмоток із жорстких секцій:

Для зручності приєднання кінців обмотки статора до електричної мережі коробка виводів із затискачами розташована поверх станини та закріплена на ній болтами. Коробка виводів герметизована прокладками. До кожного затискача коробки підімкнений відповідний вивід обмотки

статора. Для затискачів прийняті позначення, що відповідають виводам обмотки статора.

Виводи обмоток фаз розташовуються на панелі таким чином, щоб з'єднання обмоток фаз було зручно виконувати за допомогою перемичок, без перехрещування останніх (рис. 9.5 ,а).

Вмикання обмотки в зірку й трикутник за допомогою перемичок показано на рис. 9.5 ,б та 9.5 ,в.

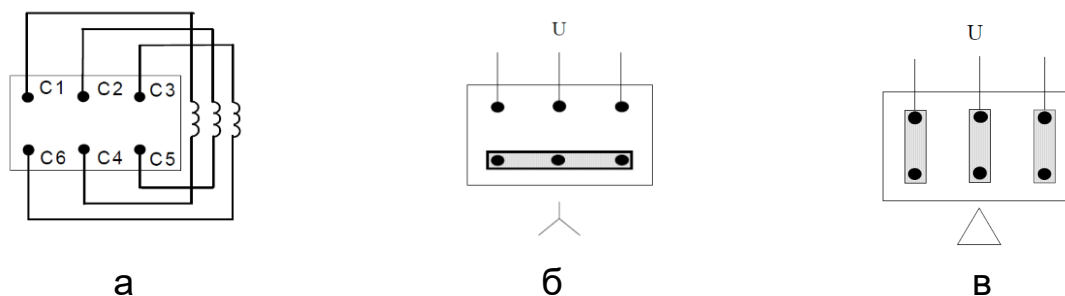


Рисунок 9.5 - Клемна панель коробки виводів

Обмотки двигунів малої та середньої потужностей виготовляють, наприклад, на напругу 220/127 В, 380/220 В. Напруга, зазначена у чисельнику, відповідає з'єднанню обмоток зіркою, у знаменнику – трикутником. У двигунах із фазним ротором є ще виводи обмотки ротора, з'єднані у зірку, – Р1, Р2, Р3.

Осердя (пакет) ротора збирають із листів електротехнічної сталі, що штампують разом із листами статора. У двигунах із короткозамкненим ротором (9.6) застосовують напівзакриті або закриті пази, що мають овальну або фігурну форми.

Обмотку ротора виконують шляхом заливки в пази під тиском алюмінієвого сплаву. Одночасно відливаються торцеві замкнуті кільця та вентиляційні лопатки (рис. 9.6 ,б).

У більш великих та спеціальних машинах у пази ротора вставляються мідні (бронзові, латунні) стержні, до яких приварюються мідні кільця, що замкнені накоротко (рис. 9.6 ,а).

Пакет з алюмінієвою кліткою напресовується на вал.

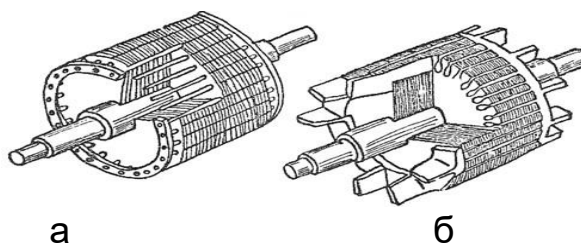
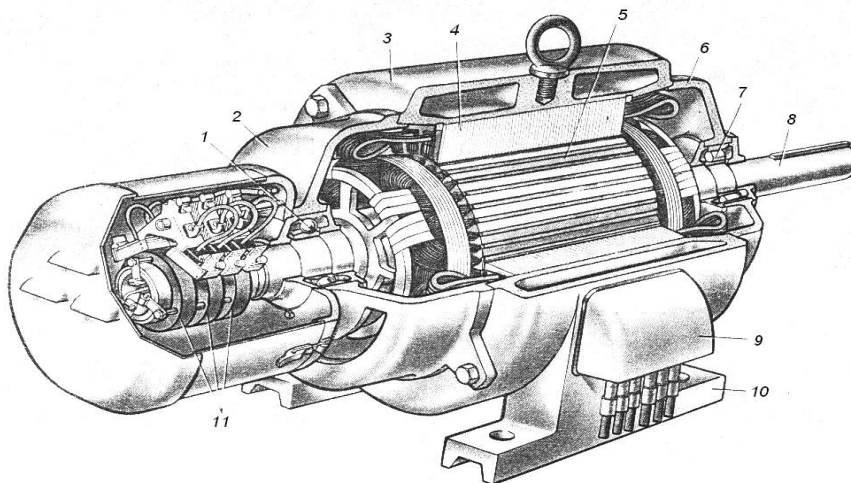


Рисунок 9.6 . - Короткозамкнені ротори АД

Таким чином, короткозамкнена обмотка ротора являє собою клітку на зразок білячої. В електричному відношенні вона є багатозазною обмоткою з числом фаз, що дорівнює числу стержнів.

Двигун з фазним ротором (рис. 9.7).



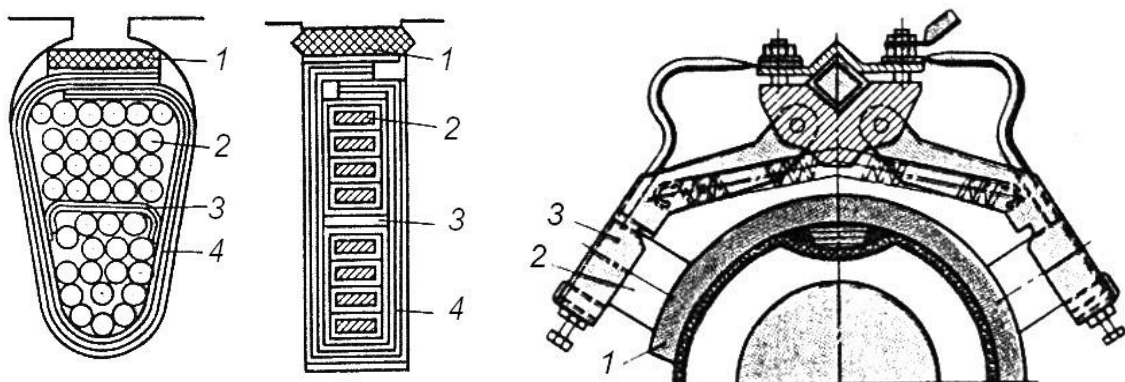
1, 7 – підшипники; 2, 6 – підшипникові щити; 3 – корпус; 4 – осердя статора з обмоткою; 5 – осердя ротора; 8 – вал; 9 – коробка виводів; 10 – лапи; 11 – контактні кільця

Рисунок 9.7 - Асинхронний двигун із фазним ротором:

Контактні кільця розташовані поза оболонкою машини, вивідні кінці обмотки ротора проходять через отвір у валу та підмикаються до контактних кілець болтами. Щіткотримачі зі щітками прикріплюються щітковою траверсою до щита. Кільця ізолювані один від одного та від вала машини, і до них через нерухомі щітки підмикають пусковий або регулювальний реостат.

Для фазних роторів застосовують пази овальної форми (рис. 9.8 ,а), куди вкладають обмотку з круглого проводу або пази прямокутної форми (рис. 9.8 ,б), куди вкладають обмотку, що складається з жорстких секцій. В АД із фазним ротором у пази укладається трифазна обмотка аналогічно обмотці статора. Лобові частини роторної обмотки спираються на ізолювані металеві кільця (рис. 9.7) та за допомогою бандажів із склострічки утримуються від деформуючих впливів, викликаних відцентровими силами.

Для здійснення електричного контакту з обмоткою обертового ротора на кожне контактне кільце 1 (рис. 9.9) накладають звичайно дві щітки 2, що розташовуються у щіткотримачах 3, які мають пружини, що забезпечують притиснення щіток до контактних кілець з певним зусиллям.



а

Рисунок 9.8 - Пази фазного ротора

б

Рисунок 9.9 - Щіткотримач

Асинхронні двигуни з фазним ротором мають більш складну конструкцію та менш надійні, але вони мають кращі регульовальні і пускові властивості, ніж двигуни з короткозамкненим ротором.

Відповідно до принципу оборотності електричних машин асинхронні машини можуть працювати в режимі двигуна, електромагнітного гальма і генератора.

Режим роботи двигуна.

При подачі напруги мережі до обмотки статора виникає магнітне поле, що обертається з частотою n_1 .

Представимо обертове магнітне поле у вигляді полюсів, що обертаються із частотою n_1 (рис. 9.10). Магнітний потік при своєму обертанні перетинає провідники обмотки ротора та індукуює у них ЕРС

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

Напрямок ЕРС визначається за правилом правої руки та показаний на рис. 9.10. При цьому враховано, що відносний рух провідників відбувається у бік, протилежний напрямку обертання поля.

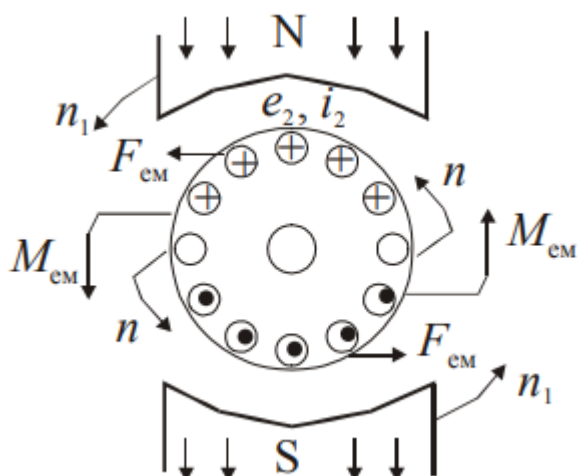


Рисунок 9.10 - Напрямок ЕРС

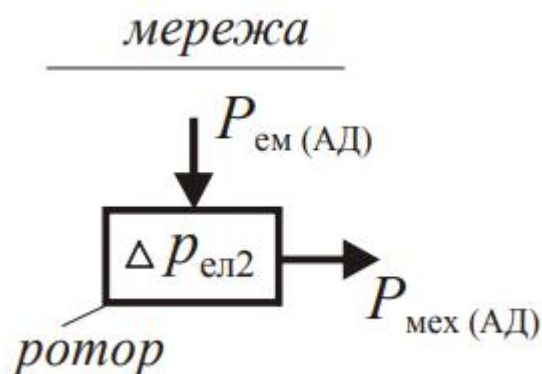


Рисунок 9.11 - Режим двигуна

Так як обмотка ротора замкнена, то в провідниках обмотки під дією ЕРС протікає струм i_2 , активна складова якого за напрямком збігається з ЕРС.

Взаємодія струму ротора з обертовим магнітним полем статора призводить до того, що на провідники ротора діють електромагнітні сили $F_{ем}$ які приводять до появи обертаючого електромагнітного моменту $M_{ем}$. Як можна встановити за правилом лівої руки, напрямок дії електромагнітних сил $M_{ем}$ збігається з напрямком обертання магнітного поля статора. Під дією $M_{ем}$ ротор приходить до обертання із частотою n у бік обертання поля.

При цьому ротор обертається з частотою $n < n_1$.

Частота обертання ротора n завжди менша від частоти обертання магнітного поля статора (синхронної частоти) n_1 .

Якщо припустити, що ротор обертається з $n = n_1$, то в обмотці ротора не буде наводитися ЕРС, не протікають струми і на ротор не діє електромагнітний момент. Таким чином, ротор АД не може самостійно обертатися із синхронною частотою n_1 .

Різниця між частотою обертання магнітного поля статора n_1 та частотою обертання ротора и називається частотою ковзання n_s

$$n_s = n_1 - n.$$

Відношення частоти ковзання n_s до частоти обертання магнітного поля статора n_1 називається ковзанням

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}.$$

Перетворимо рівняння та одержимо вираз для частоти обертання ротора

$$n = n_1(1 - s),$$

або з урахуванням того, що

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

дістаємо

$$n = \frac{60f_1}{p} * (1 - s).$$

Якщо прийняти, що $f_1 = 50$ Гц а номінальне ковзання $s_n = 0,05$, то можна розрахувати значення n_1 та n для різних чисел пар полюсів машини.

Обертове магнітне поле статора переміщається щодо ротора з частотою n_s та наводить у роторі ЕРС E_{2s} частота котрої

$$f_2 = f_1 * s.$$

Таким чином, частота струму та ЕРС в обмотці ротора залежить від ковзання АД.

Діапазон зміни ковзання для режиму двигуна. Коли ротор нерухомий, $n=0$ та $s=1$. Такий режим АД називають режимом короткого замикання (КЗ). Якщо $n = n_1$, то $s=0$ і це відповідає режиму ідеального неробочого ходу АД.

Режим двигуна АМ $0 < s < 1$.

На ротор передається електромагнітна потужність

$$P_{eM} = M_{eM} * \Omega_1 = M_{eM} * \frac{2\pi * n_1}{60} = M_{eM} * \frac{2\pi * f_1}{p}.$$

З ротора знімається повна механічна потужність

$$P_{Mex} = M_{eM} * \Omega = M_{eM} * \frac{2\pi * n}{60}.$$

Втрати в обмотці ротора

$$\Delta P_{e\lambda 2} = P_{eM} - P_{Mex} = M_{eM}(\Omega_1 - \Omega) * \frac{\Omega_1}{\Omega_1} = P_{eM} * s.$$

Електромагнітна потужність

$$P_{eM(A\Delta)} = \frac{\Delta P_{e\lambda 2}}{s} > 0.$$

Повна механічна потужність

$$P_{Mex(A\Delta)} = P_{eM} - \Delta P_{e\lambda 2} = P_{eM}(1 - s) > 0$$

У режимі роботи двигуна електромагнітна потужність $P_{eM(A\Delta)}$ додана до ротора, за відрахуванням втрат в обмотці ротора $\Delta P_{e\lambda 2}$ перетвориться в механічну потужність на валу двигуна $P_{Mex(A\Delta)}$.

Режим роботи електромагнітного гальма.

Якщо ротор під дією сторонніх сил почне обертатися у бік, протилежний напрямку обертання магнітного поля, то виникне режим електромагнітного гальма (ЕМГ) (рис. 9.12).

За цих умов електромагнітний момент машини, направлений у бік обертання поля статора, але проти обертання ротора, буде справляти на ротор гальмуючу дію.

Режим ЕМГ виникає, якщо у працюючого двигуна поміняти місцями будь-яку пару проводів, що підходять до обмотки статора. При цьому поле статора змінить свій напрямок, а ротор за інерцією буде обертатися в старому напрямку.

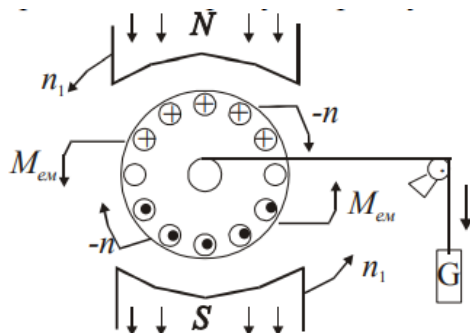


Рисунок 9.12 – Режим ЕМГ

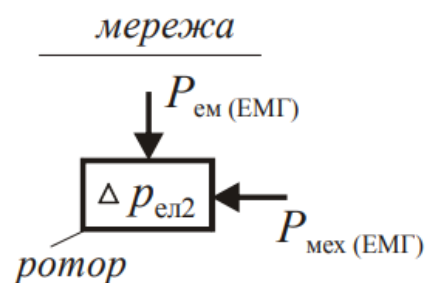


Рисунок 9.13 – Напрямок зусиль в режимі ЕМГ

Тому цей режим називають ще електромагнітним гальмуванням противмиканням. Так як частота обертання ротора від'ємна ($-n$), то відповідно ковзання стане більше за одиницю

$$s = \frac{n_1 - (-n)}{n_1} > 1.$$

Ковзання АМ у режимі ЕМГ може змінюватися в діапазоні

$$1 < s < +\infty.$$

Електромагнітна потужність

$$P_{eM(A\Delta)} = \frac{\Delta P_{e\lambda 2}}{s} > 0.$$

Повна механічна потужність

$$P_{Mex(EMГ)} = P_{eM}(1 - s) < 0$$

змінює свій знак, тобто підводиться до вала АМ (рис. 9.13). Режим ЕМГ супроводжується великими втратами в обмотці ротора.

Режим роботи генератора.

Генераторний режим виникає в тому випадку, коли ротор за допомогою стороннього двигуна обертається в напрямку обертання магнітного поля з частотою, більшою від частоти обертання магнітного поля $n > n_1$. При цьому ковзання стане від'ємним $s < 0$. ЕРС та струм в обмотці ротора змінять свій знак (рис. 9.14).

Електромагнітний момент M_{eM} , що діє на ротор, теж змінить свій напрям, тобто буде спрямований назустріч обертовому магнітному полю n_1 і стане гальмуючим відносно обертаючого моменту M_1 приводного двигуна (ПД).

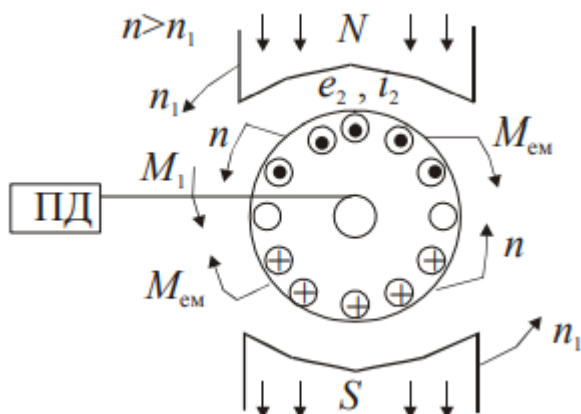


Рисунок 9.14 – Режим генератора

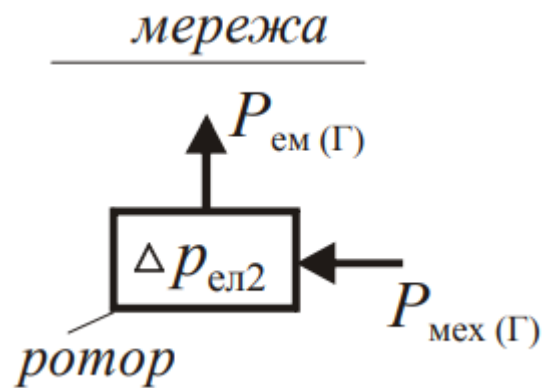


Рисунок 9.15 – Напрямок зусиль в режимі генератора

Електромагнітна потужність

$$P_{eM(Г)} = \frac{\Delta P_{eЛ2}}{s} < 0$$

та повна механічна потужність у режимі генератора змінюють свій знак (рис. 9.15).

$$P_{Mex(Г)} = P_{eM}(1 - s) < 0.$$

У генераторному режимі механічна потужність $P_{Mex(Г)}$, додана до вала машини, за відрахуванням втрат в обмотці ротора $\Delta P_{eЛ2}$ перетвориться в електромагнітну потужність $P_{eM(Г)}$.

Як підсумок на рис. 9.16 показана залежність $n = f(s)$ та позначені режими роботи асинхронної машини:

- при від'ємному ковзанні $s = 0 \div -\infty$ ($n > n_1$) - генераторний режим (Г);
- при ковзанні $s = 0 \div 1$ ($n < n_1$) — режим двигуна (Д);

- при ковзанні більше за одиницю $s = 1 \div +\infty$ режим електромагнітного гальма (ЕМГ).

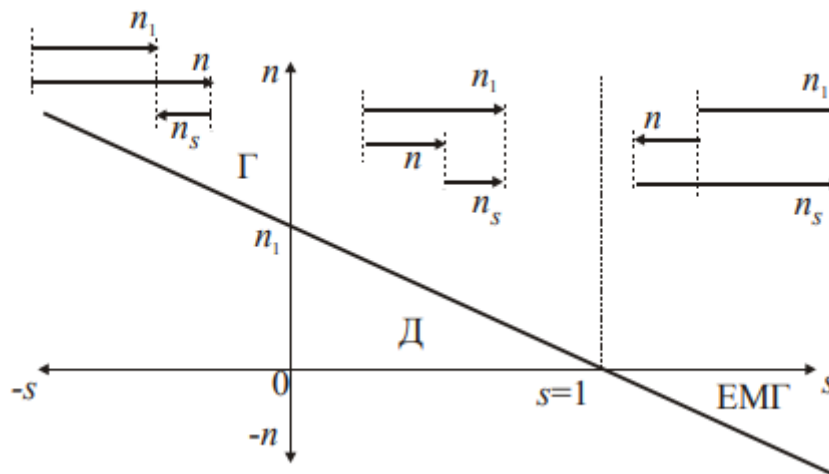


Рисунок 9.16 – Режими роботи АМ

Магнітний потік статора Φ_1 обертається в просторі з частотою $n_1 = 60f_1/p$. Оскільки поле ротора Φ_2 переміщається відносно ротора з частотою n_s , а самий ротор обертається з частотою n , то магнітний потік ротора Φ_2 обертається в просторі відносно статора з частотою

$$n + n_s = n + (n_1 - n) = n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Рівняння виконується завжди незалежно від режиму роботи АМ. Це означає, що магнітні поля статора та ротора взаємно нерухомі одне відносно одного і в результаті додавання створюють результуюче магнітне поле АМ, що, як і в трансформаторі, вважається незмінним при переході від режиму неробочого ходу до навантаження, тобто

$$\Phi^1 + \Phi^2 = \Phi_m = \text{const.}$$

Висновки.

1. Асинхронна машина є двообмотковою машиною змінного струму, у якій статор живиться від мережі фіксованої частоти, а роторна обмотка може бути короткозамкненою або фазною.
2. Асинхронні двигуни складають до 90 % усіх електроприводів завдяки простоті конструкції, високій надійності, добрим експлуатаційним властивостям і відносно низькій вартості.
3. Статор і ротор виконуються з листової електротехнічної сталі, а обмотки — з мідного проводу з тепло- та електроізоляцією класів В, F або H для важких умов роботи.
4. Ротор буває двох типів:
 - короткозамкнений — простий, надійний, малоремонтний;
 - фазний (із контактними кільцями) — складніший, але забезпечує кращі пускові й регульовальні властивості.

5. Принцип дії ґрунтується на взаємодії обертового магнітного поля статора та індукованих у роторі струмів, унаслідок чого виникає електромагнітний момент.
6. Обертання ротора завжди відстає від синхронної частоти поля, що задається поняттям ковзання s .
7. Режими роботи асинхронної машини визначаються знаком і значенням ковзання:
 - $0 < s < 1$ — режим двигуна;
 - $s > 1$ — режим електромагнітного гальма;
 - $s < 0$ — генераторний режим.
8. Магнітні потоки статора та ротора завжди обертаються з однаковою синхронною частотою в просторі, утворюючи сталий результуючий магнітний потік.

Контрольні питання.

1. Що називається асинхронною машиною?
2. Які основні частини асинхронного двигуна?
3. Які переваги асинхронних двигунів зумовили їх широке застосування?
4. Які основні недоліки асинхронних двигунів?
5. Які різновиди асинхронних двигунів випускає промисловість?
6. Які особливості конструкції статора?
7. Для чого призначена корпусна та міжвиткова ізоляція?
8. Які відмінності у конструкції ротора короткозамкненого та фазного типів?
9. Для чого використовуються контактні кільця у фазному роторі?
10. У чому полягає принцип дії асинхронного двигуна?
11. Що таке ковзання та які його допустимі значення?
12. Чому ротор не може обертатися із синхронною частотою?
13. Як змінюється частота струму ротора залежно від ковзання?
14. Охарактеризуйте режим двигуна.
15. Як виникає режим електромагнітного гальма?
16. Як змінюються момент і потужності в режимі електромагнітного гальма?
17. За яких умов асинхронна машина переходить у генераторний режим?
18. У чому полягає фізична сутність генераторного режиму АМ?
19. Яке співвідношення існує між потоками статора та ротора?
20. Як розподіляється електромагнітна потужність у ротора?

Використана література.

1. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
2. Гайденок Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.

3. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
4. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331с.
5. Текст лекцій з дисципліни «Електричні машини» Частина 1 Трансформатори. Асинхронні Машини (для студентів усіх форм навчання на прямую підготовки 6.050701 Електротехніка та електротехнології) / М. Л. Глебова, О. В. Дорохов, В. Б. Фінкельштейн, Я. Б. Форкун; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015 96 с.
6. Конспект лекцій з навчальної дисципліни „Електричні машини” (розділ “Асинхронні машини”) для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” / Укл.: к.т.н., доц. Качура О.В. Кам'янське : ДДТУ, 2018. 69 с.

ТЕМА 10. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Електромагнітний момент та робочі характеристики асинхронного двигуна. Втрати потужності та ККД асинхронного двигуна. Електромагнітний момент і механічні характеристики. Максимальний та пусковий моменти асинхронного двигуна. Процес пуску асинхронного двигуна та умови його стійкої роботи. Пуск двигунів з фазним ротором. Пуск двигунів з короткозамкненим ротором. Покращення пускових характеристик асинхронного двигуна. Способи регулювання частоти обертання. Висновки.

Енергетичні показники.

Для режиму двигуна АМ енергетична діаграму активних потужностей (рис. 10.1).

Складові активної потужності:

- потужність, споживана з мережі

$$P_1 = m_1 * U_{1\Phi} * I_{1\Phi} * \cos\phi_1$$

- електричні втрати в обмотках статора ($\Delta P_{ел1}$) та ротора ($\Delta P_{ел2}$)

$$\Delta P_{ел1} = m_1 * I_{1\Phi}^2 * r_1;$$

$$\Delta P_{ел2} = m_2 * I_2^2 * r_2 = m_1 * I_2'^2 * r_2'$$

- втрати в сталі статора

$$\Delta P_{ст1} = \Delta p_{\frac{1}{50}} * (k_{да} * B_a^2 * G_a + k_{дз} * B_z^2 * G_z) * \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,5},$$

де G_a, G_z - маса сталі ярма та зубців статора, кг;

B_a, B_z - індукція в ярмі та зубцях статора, Тл;

$k_{да}, k_{дз}$ - коефіцієнти збільшення втрат у сталі $k_{да} \approx 1,6; k_{дз} \approx 1,8;$

$\Delta p_{\frac{1}{50}}$ - питомі втрати в сталі, Вт/кг.

Оскільки частота струму в роторі $f_2 = s * f_1$ а номінальне ковзання звичайно $s_n < 0,05$ то частота f_2 мала і втратами в сталі ротора зневажають.

Додаткові втрати для номінального режиму

$$\Delta P_{дод.н} = 0,005 * P_1,$$

а для довільного навантаження

$$\Delta P_{дод} = \Delta P_{дод.н} * \left(\frac{I_1}{I_{1n}}\right)^2.$$

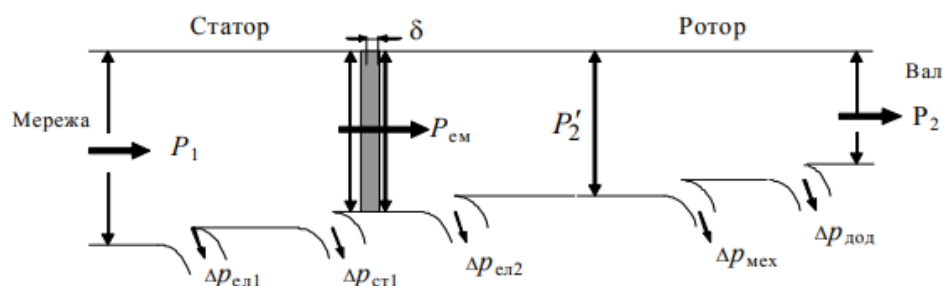


Рисунок 10.1 Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Повна механічна потужність на валу АД

$$P'_2 = P_{eM} - \Delta P_{eЛ2}$$

корисна механічна потужність на валу АД

$$P_2 = P'_2 - \Delta P_{Mex} - \Delta P_{дод.}$$

Коефіцієнт корисної дії АД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_1}$$

де $\Sigma \Delta P = \Delta P_{eЛ1} + \Delta P_{ст1} + \Delta P_{eЛ2} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{дод.}$ - сума втрат.

З рис. 10.1 електромагнітна потужність $P_{eM} = M_{eM} \cdot \Omega_1$, повна механічна потужність $P'_2 = M_{eM} \cdot \Omega$, електричні втрати в обмотці ротора

$$\Delta P_{eЛ2} = P_{eM} - P'_2 = P_{eM} \cdot s.$$

Для повної механічної потужності можна також представити у такому вигляді:

$$P'_2 = P_{eM} - \Delta P_{eЛ2} = P_{eM} \cdot (1 - s)$$

або

$$P'_2 = P_{eM} \cdot (1 - s) = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot \frac{1 - s}{s}.$$

Енергетичні діаграми активних потужностей для генераторного (рис. 10.2) та гальмового (рис. 10.3) режимів роботи АМ.

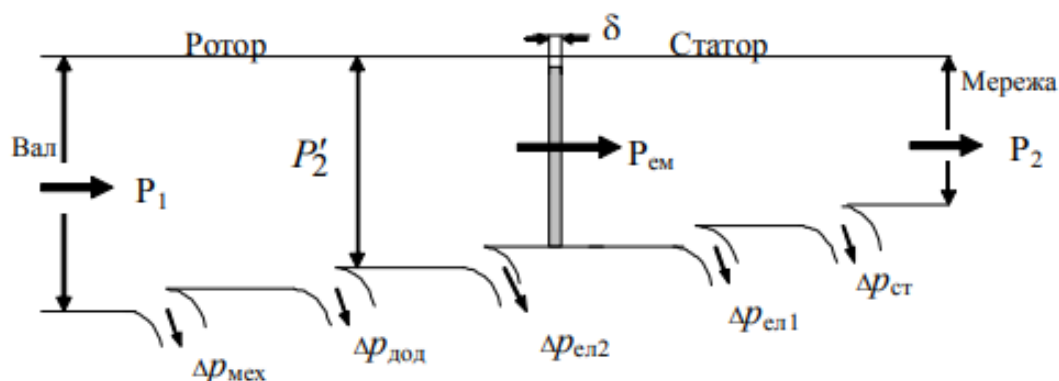


Рисунок 10.2 - Енергетична діаграма асинхронного генератора

У гальмовому режимі ковзання $s > 1$, то втрати в сталі ротора необхідно враховувати.

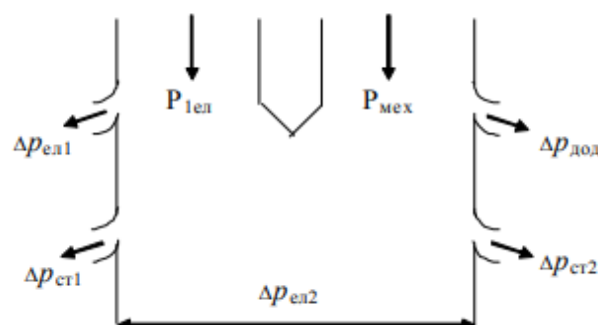


Рисунок 10.3 - Енергетична діаграма асинхронного генератора

Реактивна потужність у всіх режимах роботи вона споживається з мережі та витрачається на створення основного магнітного поля і полів розсіяння первинної та вторинної обмоток.

Енергетична діаграма реактивних потужностей АМ показана на рис. 10.4. Основну частину реактивної потужності складає Q_m , яка через наявність повітряного зазора і великого струму, що намагнічує, більше, ніж у трансформаторі.

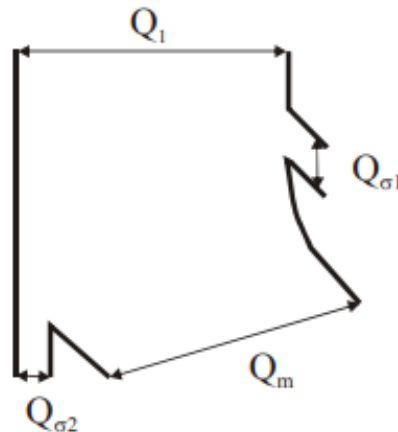


Рисунок 10.4 - Енергетична діаграма реактивних потужностей АМ

$$\begin{aligned} Q_1 &= m_1 \cdot U_{1\Phi} \cdot I_{1\Phi} \cdot \sin \phi_1; \\ Q_m &= m_1 \cdot E_1 \cdot I_0 = m_1 \cdot I_0^2 \cdot x_m; \\ Q_{\sigma 1} &= m_1 \cdot I_1^2 \cdot x_1 \\ Q_{\sigma 2} &= m_1 \cdot I_2'^2 \cdot x_2' \cdot s. \\ \cos \phi_1 &= \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}. \end{aligned}$$

Електромагнітний момент.

Електромагнітний момент АМ створюється взаємодією струму в обмотці ротора з обертовим магнітним полем. Електромагнітний момент пропорційний електромагнітній потужності

$$M_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{ем}}}{\Omega_1} = \frac{\Delta p_{\text{ел2}}}{s \cdot \Omega_1} = \frac{m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'}{s \cdot (2\pi \cdot f_1 / p)},$$

або електромагнітний момент пропорційний потужності електричних втрат в обмотці ротора.

Електромагнітний момент при будь-якому заданому значенні ковзання пропорційний квадрату прикладеної напруги і тим менший, чим більші значення r_1 та індуктивних опорів розсіяння машини x_1 та x_2' .

Вираз для електромагнітного моменту:

$$M_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{ем}}}{\Omega_1} = \frac{p \cdot m_1 \cdot 2\pi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \kappa_{\text{об1}} \cdot \Phi_m \cdot I_2' \cdot \cos \psi_2}{\sqrt{2} \cdot 2\pi \cdot f_1},$$

або

$$M_{\text{ем}} = c_m \cdot \Phi_m \cdot I_2' \cdot \cos \psi_2,$$

де $c_m = \frac{p \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot K_{\text{обл}}}{\sqrt{2}}$ – коефіцієнт, постійний для конкретної машини,
 ψ_2 – фаза струму ротора.

При роторі, що обертається:

$$\psi_2 = \arctg [(x_2 \cdot s) / r_2].$$

При нерухомому роторі:

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2 / s}.$$

Механічна характеристика.

За виразом

$$M_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{ем}}}{\Omega_1} = \frac{\Delta p_{\text{ел2}}}{s \cdot \Omega_1} = \frac{m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'}{s \cdot (2\pi \cdot f_1 / p)},$$

можна побудувати графік залежності $M_{\text{ем}} = f(s)$, названий механічною характеристикою. При побудові характеристики виходять із того, що всі величини формули за винятком ковзання є постійними.

На рис. 10.5 показана механічна характеристика асинхронної машини. Вона збудована для трьох можливих режимів роботи асинхронної машини: рухового ($0 < s \leq 1$), коли електромагнітний момент є обертаючим; генераторного ($-\infty < s < 0$) та гальмового ($1 < s < \infty$) коли електромагнітний момент є гальмуючим. На рис. 10.5 показані характерні точки для рухового режиму роботи.

У момент пуску частота обертання ротора $n = 0$ та $s = 1$. Момент, що розвивається при цьому, називають пусковим

$$M_{\text{п}} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{2\pi \cdot f_1 \left[(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}.$$

Під дією цього моменту ротор двигуна приводиться до обертання, при цьому ковзання зменшується, а момент збільшується. Пусковий момент є важливим показником, що визначає пускові властивості двигуна.

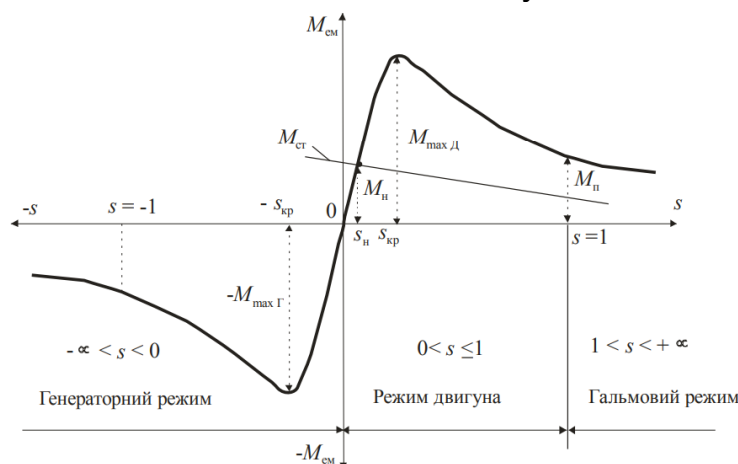


Рисунок 10.5 - Залежність $M_{em} = f(s)$ асинхронної машини

Частіше його виражають у частках номінального моменту. Цей коефіцієнт називають кратністю пускового моменту

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_n} = 0,8 \div 2.$$

При критичному ковзанні $s_{кр}$ електромагнітний момент досягає свого максимального значення M_{max} .

$$s_{кр} = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}},$$

але, так як $r_1 \ll x_1 + x'_2$ то

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r'_2}{x_1 + x'_2}.$$

Вираз для максимального моменту АМ

$$M_{max} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2}{4\pi \cdot f_1 \cdot \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right]}.$$

Відношення максимального моменту до номінального називають кратністю максимального моменту, або перевантажувальною спроможністю

$$k_{max} = \frac{M_{max}}{M_n} = 1,8 \div 2,6.$$

Знак «+» – для рухового, «-» – для генераторного режимів роботи АМ. Максимальний момент у генераторному режимі більший, ніж у руховому ($M_{max г} > M_{max д}$).

Після досягнення M_{max} у руховому режимі швидкість обертання ротора продовжує збільшуватися, а момент починає зменшуватися. Так буде доти, поки електромагнітний момент не стане дорівнювати сумі протидіючих моментів або статичному моменту навантаження на валу двигуна $M_{ст}$

$$M_{em} = M_{ст} = M_0 + M_2,$$

де M_0 - момент неробочого ходу;

M_2 - корисний навантажувальний момент на валу двигуна.

Сталий режим роботи двигуна визначається точкою на механічній характеристиці з координатами M_n та s_n .

Відношення M_{em}/M_{max}

$$\frac{M_{em}}{M_{max}} = \frac{2(1 + \frac{r_1}{r'_2} \cdot s_{кр})}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}} + \frac{2 \cdot r_1}{r'_2} \cdot s_{кр}}.$$

При знехтуванні активним опором ($r_1 = 0$) вираз набуває вигляду формули Клосса

$$\frac{M_{\text{ем}}}{M_{\text{max}}} = \frac{2}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}.$$

Формула Клосса використовується для побудови залежності $M_{\text{ем}}=f(s)$ за каталожними даними. Знаючи $M_{\text{н}}$, $s_{\text{н}}$, k_{max} , визначають $s_{\text{кр}}$

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{н}} \cdot \left(k_{\text{max}} + \sqrt{k_{\text{max}}^2 - 1} \right).$$

Потім, задаючись ковзанням s , знаходять момент $M_{\text{ем}}$.

Механічну характеристику можна також представити у вигляді залежності $n=f(M_{\text{ем}})$ рис. 10.6.

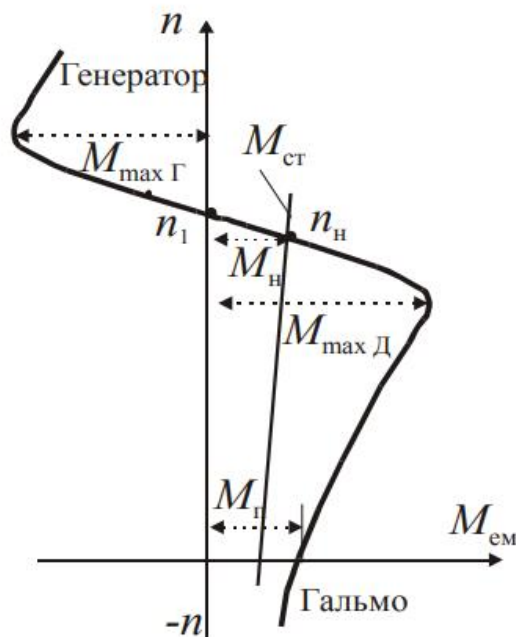


Рисунок 10.6 - Механічна характеристика АМ $n = f(M_{\text{ем}})$

Пуск трифазних асинхронних двигунів.

У процесі пуску змінюються величини струмів I_1 та I'_2 , електромагнітного моменту $M_{\text{ем}}$, ковзання s .

Пускові властивості двигуна оцінюються за його пусковими характеристиками:

- величиною пускового струму або його кратністю $k_i=4\dots7$;
- величиною пускового моменту або його кратністю $k_{\text{п}}\geq 1,1\dots1,7$;
- тривалістю і плавністю пуску двигуна;
- складністю пускової операції;
- економічністю пуску (втрати потужності, вартість та надійність пускової апаратури).

При $s = 1$ величина пускового струму

$$I_{1\text{п}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2}} = \frac{U_1}{z_{\text{к}}};$$

та величина пускового моменту при $I'_{2п} \approx I_{1п} = I_{п} (I_0 = 0)$

$$M_{п} = \frac{m_1 \cdot I_{п}^2 \cdot r'_2}{\Omega_1} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r'_2}{\Omega_1 \cdot z_k^2}.$$

З цих виразів випливає, що поліпшити пускові властивості двигуна можна збільшенням активного опору кола ротора r'_2 , тому що в цьому випадку зменшується пусковий струм та збільшується пусковий момент.

Водночас зменшення напруги приводить до зниження і пускового струму, і пускового моменту.

Можливість застосування того або іншого способу поліпшення пускових характеристик визначається умовами експлуатації двигуна і вимогами, що до нього висуваються.

Способи пуску двигунів з короткозамкненим ротором.

Прямий пуск.

Якщо при пуску двигуна не потрібно зниження пускового струму, то застосовують найбільш простий та надійний спосіб прямого вмикання обмотки статора у мережу. При цьому розгін двигуна визначається за природною механічною характеристикою машини (рис. 10.7).

Асинхронні двигуни проектується так, щоб при прямому пуску пускові струми ($k_i = 4 \dots 7$) не створювали надмірних електродинамічних зусиль та перегрівів.

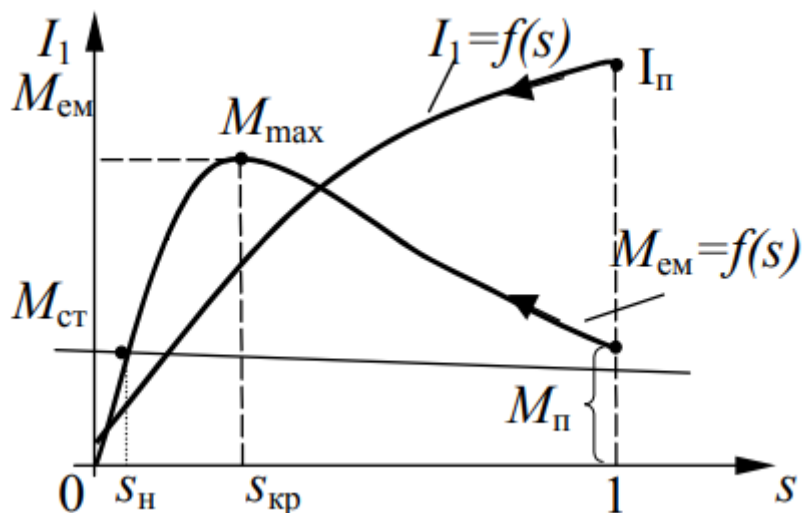


Рисунок 10.7 - Пускові характеристики АД

Питання про можливість застосування прямого вмикання двигуна вирішується частіше за все на основі оцінки зниження напруги мережі при пуску.

При прямому пуску двигунів великої потужності в мережах недостатньої потужності можуть виникнути великі падіння напруги (понад

10÷15%), що неприпустимо. Тому потужність мережі повинна бути нескінченно великою порівняно з потужністю двигуна.

За потреби зменшення пускового струму застосовують якийсь із способів пуску при зниженій напрузі.

Пуск перемиканням обмотки статора з трикутника на зірку.

Цей спосіб пуску може бути застосований тільки для тих двигунів, у яких при номінальній напрузі обмотка статора з'єднана у трикутник. У момент підмикання двигуна до мережі обмотку статора перемикають у зірку (Y). Після того як двигун розженеться до частоти обертання, близької до номінальної, обмотку перемикають у трикутник (Δ).

Виникаючий при цьому поштовх струму невеликий і не впливає на роботу мережі. Схема пуску наведена на рис. 10.8.

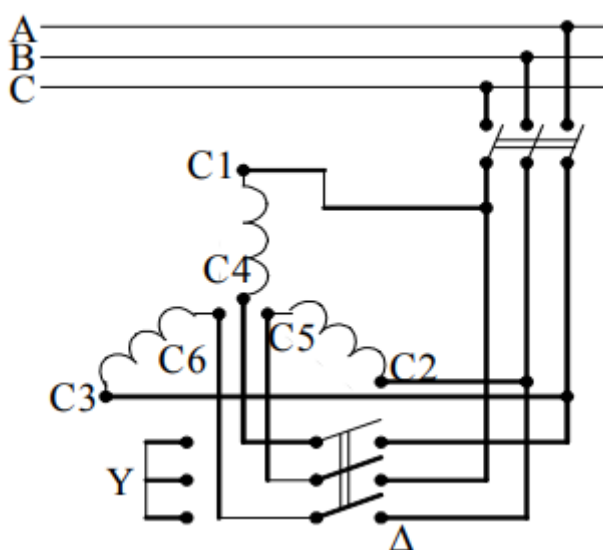


Рисунок 10.8 - Схема пуску АД перемиканням обмотки статора з Δ на Y

При такому перемиканні фазна напруга на обмотці статора знижується в $\sqrt{3}$ разів: $U_{\phi Y} = \frac{U_{\phi \Delta}}{\sqrt{3}}$

Пусковий струм, що протікає по фазах обмотки двигуна, зменшується

$$I_{\phi Y} / I_{\phi \Delta} = 1 / \sqrt{3}.$$

Пусковий струм, споживаний із мережі, зменшується в 3 рази:

$$I_{пY} / I_{п\Delta} = 1 / 3.$$

Це дуже важлива перевага розглянутого способу пуску.

Проте пусковий момент знижується пропорційно квадрату відношення фазних напруг, тобто в 3 рази.

Тому даний спосіб пуску може застосовуватися тільки там, де навантажувальний момент при пуску значно менший від номінального.

До недоліків даного перемикання належить неплавність пускової операції, що має тільки два пускових ступеня та збільшення тривалості пуску.

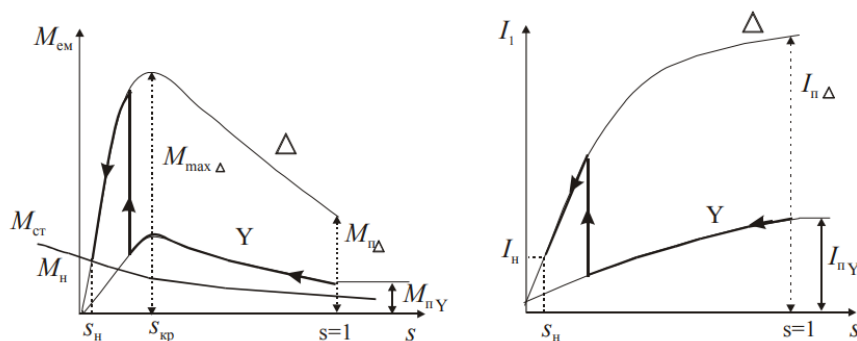


Рисунок 10.9. Залежності $M_{\text{ем}} = f(s)$ та $I_1 = f(s)$ при перемиканні обмотки статора з Y на Δ

Реакторний пуск.

Реакторний пуск здійснюється відповідно до схеми на рис. 10.10. спочатку вмикається рубильник QF1, рубильник QF2 вимкнений.

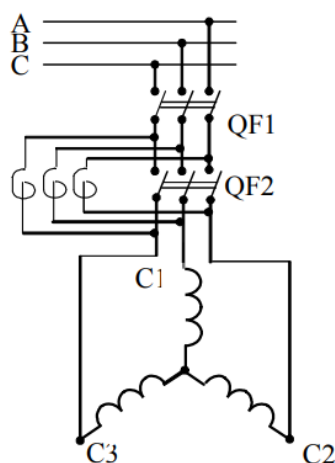


Рисунок 10.10 - Схема пуску АД через реактор.

Двигун одержує живлення через трифазний реактор, опір якого x_p обмежує величину пускового струму

Початковий пусковий момент при реакторному пуску знижується.

Кратність пускового моменту

$$\kappa_{\text{п}} = M_{\text{п}} / M_{\text{н}} = \kappa_i^2 \cdot s_{\text{н}}.$$

Якщо, наприклад, номінальне ковзання $s_{\text{н}} = 0,02$, а кратність пускового струму за допомогою реактора знизили до $k_i = 3$, то виходить достатньо велике зниження кратності пускового моменту

$$\kappa_{\text{п}} = \kappa_i^2 \cdot s_{\text{н}} = 3^2 \cdot 0,02 = 0,18.$$

Автотрансформаторний пуск.

Схема підмикання двигуна до мережі через знижувальний автотрансформатор (АТ) наведена на рис. 30.5.

При пуску рубильники QF1 та QF3 замкнені, а QF2 розімкнений. При цьому на обмотку статора двигуна надається напруга U_1 з вторинної обмотки знижувального АТ.

По закінченні процесу пуску розмикається QF3 та замикається QF2. Напруга, яка подається на двигун,

$$U_1 = U_H / \kappa_a ,$$

де κ_a - коефіцієнт трансформації АТ.

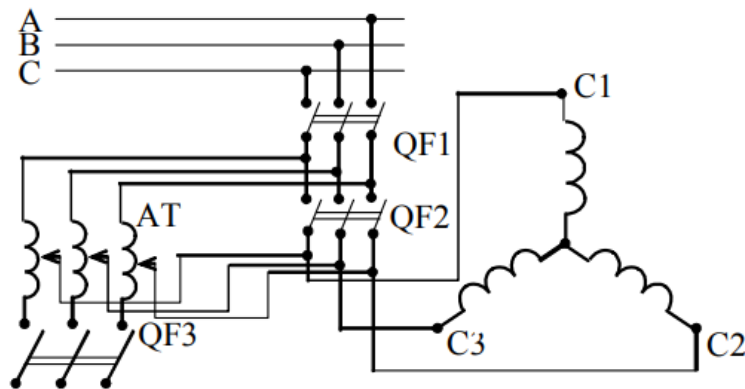


Рисунок 10.11 - Схема пуску АД через АТ.

Пусковий струм двигуна на виході АТ

$$I_{\text{пд}} = \frac{U_1}{Z_K} = \frac{U_H}{\kappa_a \cdot Z_K} .$$

Пусковий струм у мережі

$$I_{\text{пс}} = \frac{I_{\text{пд}}}{\kappa_a} = \frac{U_H}{\kappa_a^2 \cdot Z_K} = \frac{I_{\text{кз}}}{\kappa_a^2} ,$$

де $I_{\text{кз}} = U_H / Z_K$ - струм короткого замикання, або пусковий струм при прямому підмиканні до мережі на номінальну напругу.

Кратність пускового моменту

$$\kappa_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_H} = \frac{\kappa_a^2 \cdot I_{\text{пс}}^2 \cdot S_H}{I_H^2} = \frac{I_{\text{кз}}}{I_{\text{пс}}} \cdot S_H \cdot \frac{I_{\text{пс}}^2}{I_H^2} = \frac{I_{\text{пс}}}{I_H} \cdot S_H \cdot \frac{I_{\text{кз}}}{I_H} = \kappa_i \cdot S_H \cdot \frac{I_{\text{кз}}}{I_H} .$$

При автотрансформаторному (АТ) пуску $M_{\text{п}}$ та $I_{\text{пс}}$ знижуються однаково. З рис. 10.12 видно, що при однакових величинах κ_i при АТ пуску кратність пускового моменту більша, ніж у реакторному.

Способи пуску двигуна зменшенням напруги можуть бути застосовні при малих навантажувальних моментах на валу ($M_{\text{ст}}$). Якщо ж момент $M_{\text{ст}}$ великий, то використовують двигун із фазним ротором, у якому при пуску в коло ротора вводять активний додатковий опір.

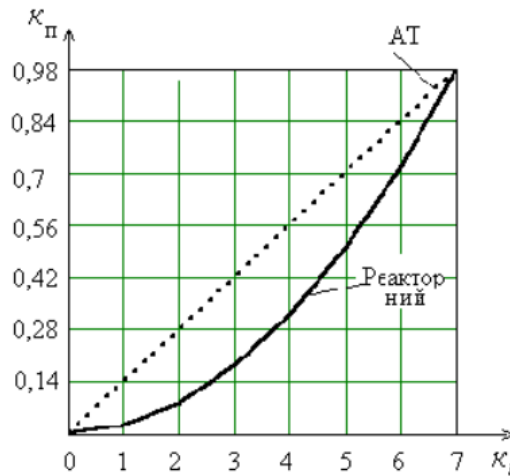


Рисунок 10.12 - Залежності $k_{п} = f(k_i)$

Пуск асинхронних двигунів з фазним ротором.

У двигунах із фазним ротором можна ввімкнути в коло обмотки ротора пусковий реостат і тим самим збільшити активний опір кола ротора. При цьому вдається знизити величину пускового струму та збільшити пусковий момент

$$I_{п} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2 + R_d)^2 + (x_1 + x'_2)^2}};$$

$$M_{п} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot (r'_2 + R_d)}{2\pi \cdot f_1 \left[(r_1 + r'_2 + R_d)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}.$$

Найбільший пусковий момент $M_{пmax}$ відповідає активному додатковому опору в колі ротора:

$$R_d \approx x_1 + x'_2 - r'_2.$$

При подальшому збільшенні R_d пусковий момент зменшується. При виборі опору R_d пускового реостата (РП) виходять із величини навантажувального моменту $M_{ст}$.

При великому навантажувальному моменті R_d повинен бути таким, щоб забезпечити найбільшу величину пускового моменту.

При малих навантажувальних моментах, коли величина пускового моменту не має вирішального значення для пуску, виявляється доцільним величину опору R_d вибирати декілька більшою від тієї, що відповідає найбільшому пусковому моменту.

У цьому випадку пусковий момент стає меншим від найбільшого, але величина пускового струму значно зменшується.

На рис. 10.13 показана схема вмикання пускового реостата в коло двигуна з контактними кільцями. Перед пуском щітки повинні бути опущені на контактні кільця ротора і всі ступені пускового реостата ввімкнені.

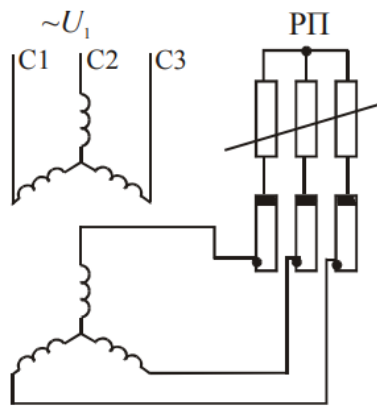


Рисунок 10.13 - Схема вмикання пускового реостата

По мірі розгону двигуна опір пускового реостата зменшують, переходячи з одного ступеня на другий. Цей перехід може здійснюватися як вручну, так і автоматично шляхом шунтування частини опорів за допомогою контакторів. Ступені пускового реостата розраховують таким чином, щоб при перемиканнях обертаючий момент двигуна змінювався в обраних межах від $M_{пmax}$ до $M_{пmin}$.

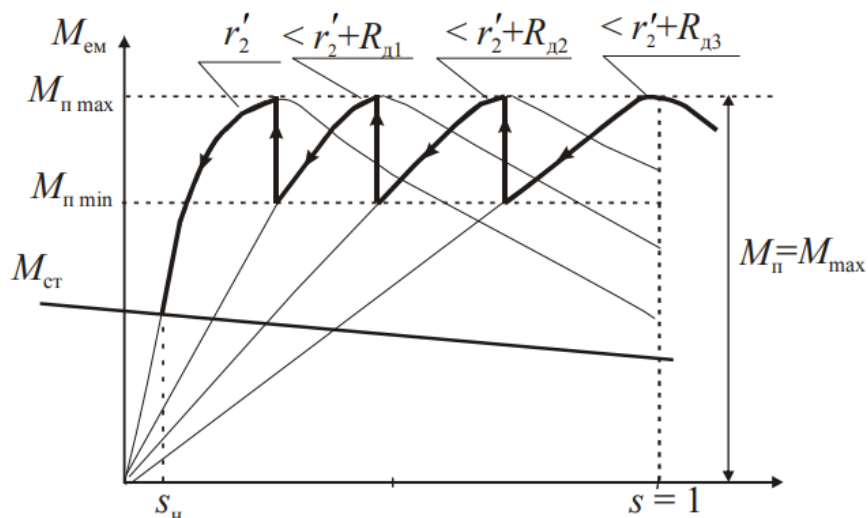


Рисунок 10.14 - Пускові характеристики АД з фазним ротором

Пускові реостати розраховані на короточасну роботу під струмом, і тому після того, як процес пуску закінчений, пусковий реостат вимикають. За допомогою спеціального механізму щітки піднімають із контактних кілець і кільця замикають накоротко, тобто двигун працює з замкненою обмоткою ротора.

Недоліком є складність, тривалість та неекономічність пускової операції, що пов'язано з непродуктивною витратою енергії в пусковому реостаті.

Асинхронні двигуни з поліпшеними пусковими властивостями.
Асинхронні двигуни з глибокими пазами.

Незадовільні пускові властивості АД з КЗ ротором звичайного типу привели до необхідності створення АД з КЗ ротором із поліпшеними пусковими властивостями: великим пусковим моментом при малому пусковому струмі.

Одним із таких двигунів є двигун із глибокими пазами на роторі. Пази ротора являють собою глибокі щілини, в які вкладені стержні роторної обмотки.

У двигунах з глибокими пазами використовується явище витиснення струму в стержнях клітки ротора.

Асинхронні двигуни з подвійною кліткою на роторі.

Двигуни з подвійною кліткою на роторі мають добрі пускові властивості. Обмотки ротора з подвійною кліткою складаються з робочої клітки, стержні якої розташовуються в нижньому шарі, та пускової клітки, стержні якої розміщені у верхньому шарі, ближче до повітряного зазора.

На рис. 10.15 показані види пазів із подвійною кліткою.

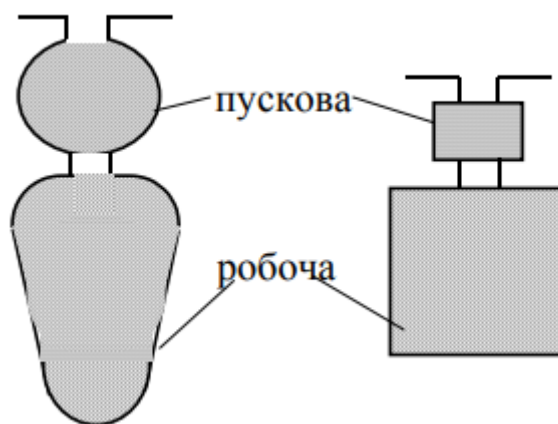


Рисунок 10.15 - Пази ротора з подвійною кліткою

Верхня клітка паза виконується меншого перетину з матеріалу з великим питомим опором (латунь, алюмінієва бронза), тобто має великий активний опір. Нижня клітка має великий перетин і виконується з міді, тобто має малий активний опір.

Індуктивний опір робочої клітки більший, ніж пускової, особливо в початковий період пуску, коли частота струму в роторі $f_2 = f_1 s$.

При $s = 1$ повний опір нижньої клітки виявляється значно більшим від повного опору верхньої клітки і при однакових ЕРС, індукованих основним обертовим полем в провідниках паза ротора, струм у верхній клітці значно більший, ніж у нижній. Так як пускова клітка має більший активний опір, то момент, створюваний цим струмом при пуску, буде також більшим.

Після розгону двигуна його ковзання і частота струму в роторі будуть малі, що приведе до зменшення індуктивних опорів кліток. Значення струмів у клітках будуть залежати головним чином від їхніх активних опорів. Оскільки нижня клітка має менший активний опір, ніж верхня, то більший

струм буде протікати по ній. Отже, при малих ковзаннях момент двигуна створюється нижньою кліткою.

У двигунів із подвійною кліткою пускові характеристики кращі, ніж у двигуна з глибокими пазами. Через великий індуктивний опір робочої клітки $M_{\max}$ в двигунах із подвійною кліткою нижче, ніж у звичайних двигунах і двигунах із глибокими пазами.

Проте поліпшення пускових характеристик приводить до погіршення робочих, зменшується $\cos \varphi_1$ у номінальному режимі.

Крім двигунів із глибокими пазами і подвійною кліткою, широкое поширення одержали двигуни з пляшковою та клиноподібною формами пазів ротора. Стовщення нижньої частини стержнів посилює ефект зміни опорів при витисненні струму.

За пусковими властивостями такі двигуни наближаються до двигунів із подвійною кліткою, а з погляду виготовлення вони простіше від останніх.

Висновки.

1. Електромагнітний момент асинхронного двигуна визначається взаємодією струмів ротора з обертовим магнітним полем та прямо пропорційний електромагнітній потужності. На його величину суттєво впливають ковзання, прикладена напруга та опори обмоток статора і ротора .
2. Механічна характеристика АД описує залежність моменту від ковзання та дозволяє визначити режим роботи: двигунний, генераторний або гальмівний. Характеристика має максимум при критичному ковзанні (s_{cr}), що відповідає максимальному моменту $M_{\max}$.
3. Пуск асинхронного двигуна супроводжується великими струмами ($k_i = 4 \dots 7$) і меншим моментом. Тому застосовуються різні способи поліпшення пускових властивостей: перемикання « Δ – Y », реакторний або автотрансформаторний пуск, а також двигуни зі зміненою конструкцією ротора (глибокі пази, подвійна клітка) .
4. Двигуни з фазним ротором дозволяють вводити додатковий опір у коло ротора, що забезпечує підвищення пускового моменту та зменшення пускового струму. Це робить їх придатними для механізмів з великим моментом навантаження .
5. Енергетичні показники АД визначаються втратами в обмотках, сталі, механічними втратами та додатковими втратами. ККД зростає зі збільшенням навантаження та зменшується при відхиленнях ковзання від номінального значення .
6. Спеціальні конструкції ротора (глибокі пази, подвійна клітка, клиноподібні пази) покращують пускові характеристики, але можуть дещо погіршувати робочі енергетичні параметри, зокрема $\cos \varphi$.

Контрольні питання.

1. Визначення електромагнітного моменту асинхронного двигуна та фактори, що впливають на його величину.

2. Як пов'язана електромагнітна потужність із механічною потужністю на валу двигуна?
3. Поняття ковзання та його значення для режимів роботи асинхронного двигуна.
4. Як змінюється електромагнітний момент при зміні напруги живлення?
5. У чому полягає фізичний зміст механічної характеристики $M_{em} = f(s)$?
6. Що таке критичне ковзання та чому йому відповідає максимальний момент?
7. Визначення пускового моменту та його кратності.
8. Визначення максимального моменту та коефіцієнта перевантажувальної здатності.
9. Яким чином активний опір кола ротора впливає на пускові характеристики?
10. Принципи прямого пуску трифазного асинхронного двигуна.
11. Переваги та недоліки перемикання обмоток статора «Δ–Y» під час пуску.
12. Особливості реакторного пуску та його вплив на струм і момент.
13. Принцип автотрансформаторного пуску, його переваги над реакторним.
14. Чому двигуни з фазним ротором мають кращі можливості регулювання пускових моментів?
15. Роль пускового реостата та принципи його використання.
16. Як впливають глибокі пази на пускові характеристики асинхронного двигуна?
17. Конструктивні особливості ротора з подвійною кліткою.
18. Порівняння пускових властивостей двигунів із глибокими пазами і подвійною кліткою.
19. Додаткові втрати та їх значення в енергетичному балансі асинхронного двигуна.
20. Як визначається ККД асинхронного двигуна та які втрати на нього впливають?

Використана література.

1. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
2. Гайденок Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
3. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.

4. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331 с.
5. Текст лекцій з дисципліни «Електричні машини» Частина 1 Трансформатори. Асинхронні Машини (для студентів усіх форм навчання на пряму підготовки 6.050701 Електротехніка та електротехнології) / М. Л. Глебова, О. В. Дорохов, В. Б. Фінкельштейн, Я. Б. Форкун; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015 96 с.

ТЕМА 11. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Улаштування, принцип дії та характеристики синхронних машин. Явнополюсні та неявнополюсні синхронні машини. Способи збудження синхронних машин. Втрати потужності та ККД синхронних машин. Висновки.

Синхронні машини

Режими роботи синхронної машини

В асинхронних машинах струм в обмотці ротора виникає завдяки ковзанню ротора в магнітному полі. Унаслідок цього частота струму ротора f_2 залежить від швидкості обертання ротора і, отже, від навантаження АМ.

Якщо на обмотку ротора подати напругу U_2 заданої частоти f_2 , то частота струму в обмотці ротора тим самим буде задана. Але якщо частоти в колах обмоток статора та ротора задані, то ковзання машини і, отже, частота обертання ротора n виходять цілком визначеними і не залежними від навантаження машини

$$n = n_1 - n_s = \frac{60f_1}{p} - \frac{60f_2}{p} = \frac{60(f_1 - f_2)}{p}.$$

Таку машину змінного струму, частота обертання якої знаходиться у строгій відповідності із частотою мережі, називають синхронною.

Переважає поширення одержали синхронні машини, в яких на обмотку ротора подається постійна напруга з $f_2 = 0$. При цьому частота обертання ротора машини дорівнює частоті обертання магнітного поля статора

$$n = n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

Оскільки ротор синхронної машини n обертається із синхронною частотою n_1 поля в зазорі, то в обмотці ротора не індукуються ЕРС. Величина постійного струму в обмотці ротора визначається тільки підведеною ззовні до обмотки напругою та її активним опором.

Обмотка, в якій тече постійний струм, називається обмоткою збудження (ОЗ), тому що вона збуджує в машині магнітне поле незалежно від режиму роботи.

Електричне з'єднання обмотки збудження із зовнішнім джерелом (збудником) здійснюється за допомогою пристрою, що складається з двох контактних кілець, до яких приєднується обмотка, і щіток, що ковзають по поверхні кілець та з'єднані із зовнішнім джерелом.

Обмотка статора повинна мати таке ж число полюсів, що і ротор.

У пазах статора синхронної машини розташовують симетричну трифазну обмотку. На рис. 11.1, а представлена електрична схема синхронного генератора.

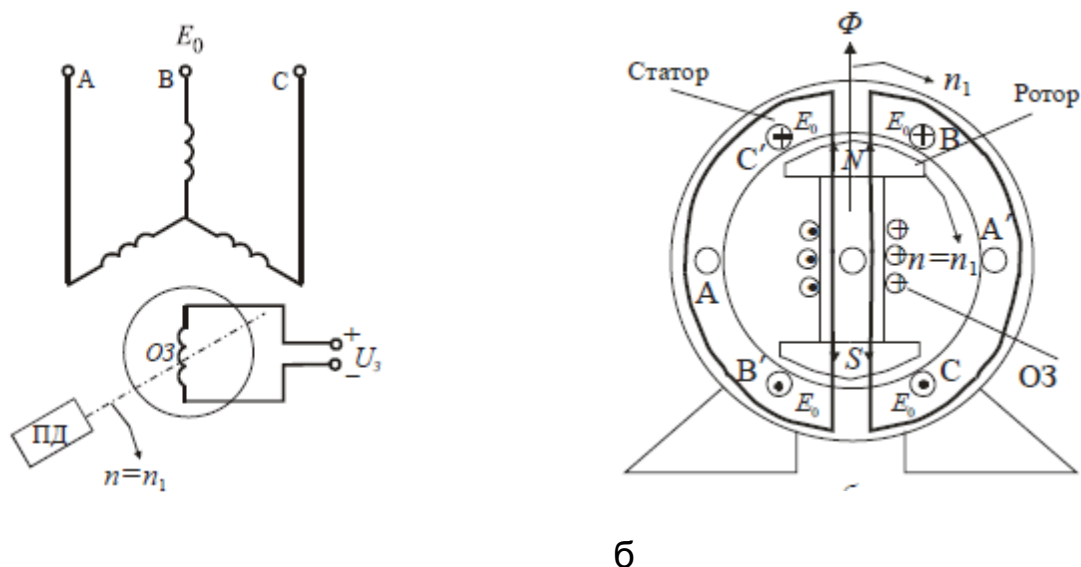


Рисунок 11.1 - Електрична схема синхронного генератора –а та напрямки ЕРС в обмотці статора –б

Первинний двигун (ПД) обертає ротор з обмоткою збудження. На обмотку збудження подають напругу від джерела постійного струму. Збуджений ротор синхронної машини приводиться в обертання зі швидкістю n_1 .

Обертове поле збудження наводить в обмотці статора змінну ЕРС із частотою

$$f_1 = \frac{pn_1}{60}$$

Напрямок індукованої полем збудження ЕРС E_0 визначається за правилом правої руки і позначений на рис. 3.21 ,б знаком «+» у верхній частині провідників обмотки статора та знаком «•» у нижній частині. При цьому враховано відносно переміщення провідників обмотки статора відносно обертового двополюсного поля збудження – поле рухається вправо, провідники – вліво.

Якщо обмотку статора підключити до якого-небудь навантаження, то трифазний струм, що протікає по цій обмотці, створює обертове магнітне поле, перша гармоніка якого обертається в тому ж напрямку і з тією же частотою n_1 , що і ротор.

Результуючий магнітний потік Φ синхронної машини створюється спільною дією МРС обмотки збудження та МРС обмотки статора, і результуюче магнітне поле обертається в просторі з тією же частотою, що і ротор.

У синхронній машині обмотку, в якій індукується ЕРС та проходить струм навантаження, називають обмоткою якоря (статора), а частина машини, на якій розташована обмотка збудження, – індуктором. Таким чином, у приведеній СМ статор є якорем, а ротор – індуктором.

Синхронна машина може працювати автономно як генератор на автономне, підімкнене до неї навантаження, чи паралельно з мережею, до якої підімкнені інші генератори.

При роботі паралельно з мережею вона може віддавати або споживати електричну енергію, тобто працювати генератором або двигуном.

У режимі двигуна вісь поля ротора відстає від осі поля статора на кут θ . У режимі двигуна поле статора є ведучим.

Синхронні двигуни (СД) застосовуються головним чином для привода пристроїв великої потужності у великих енергетичних установках.

СД використовують як компенсатори – генератори реактивної потужності, що дають можливість підвищити коефіцієнт потужності мережі. Синхронні генератори (СГ) складають основу електротехнічного устаткування електростанцій, тобто практично вся електрична енергія виробляється СГ.

Типи синхронних машин та їх будова.

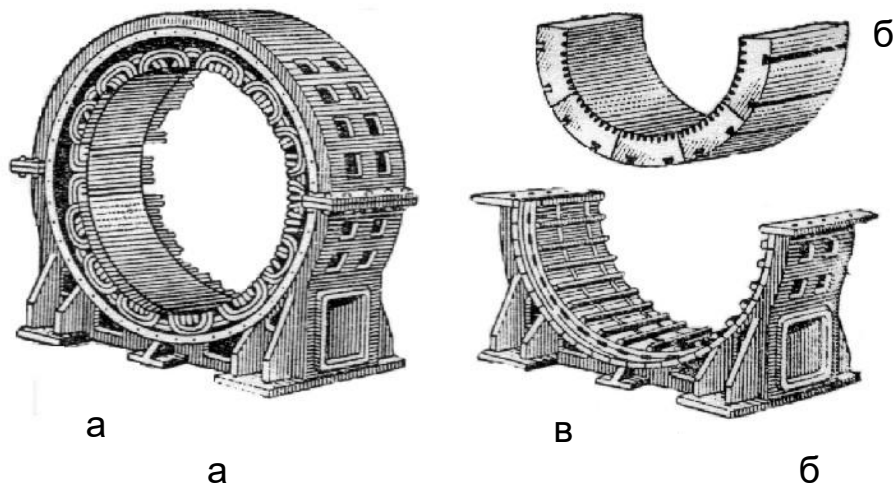
Синхронна машина складається з нерухомої частини – статора (якоря) і обертової частини – ротора.

Конструкція синхронних машин, і в першу чергу конструкція ротора, обумовлюється частотою обертання. При $n < 750 \text{ об/хв}$ ($p > 4$), тобто в гідрогенераторах, синхронних компенсаторах і в тихохідних двигунах, застосовується явнополюсне виконання ротора.

Синхронні машини з неявнополюсним ротором – турбогенератори – виготовляються з частотою обертання 3000 об/хв у двополюсному виконанні ($p=1$) та 1500 об/хв у чотириполюсному виконанні ($p=2$).

Явнополюсні синхронні машини

Конструкція статора СМ нічим не відрізняється від конструкції статора АМ (рис. 11.2). Осердя статора являє собою порожній циліндр, набраний з окремих листів електротехнічної сталі.

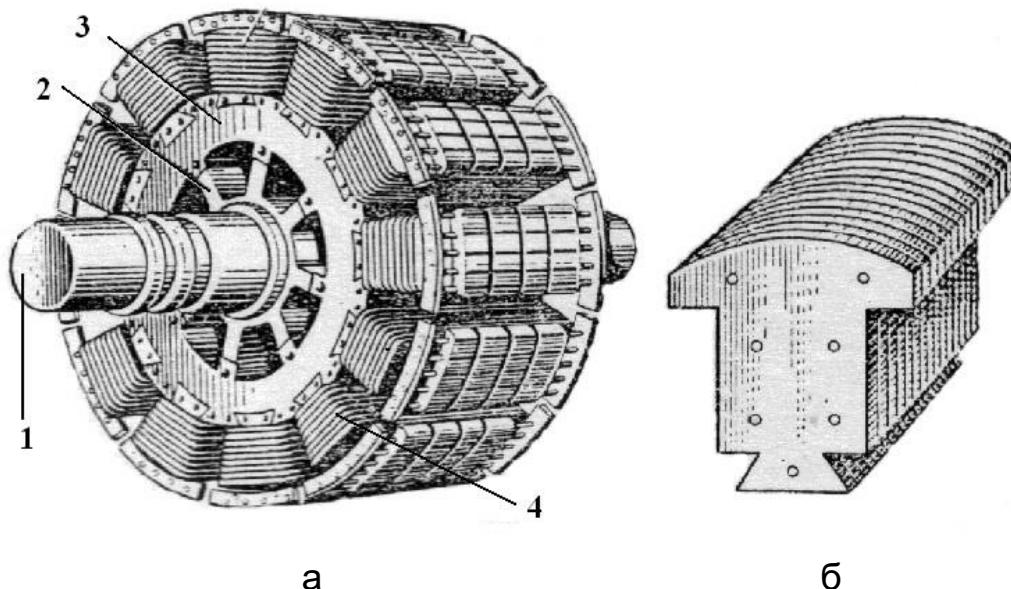


а – у зібраному вигляді; б – частина осердя; в – частина
Рисунок. 11.2 - Статор синхронної машини: станини

При зовнішньому діаметрі статора менше ніж 900 мм його збирають з цільних кільцевих пластин, а при більшому діаметрі – з окремих пластин, називаних сегментами. Пази осердя статора мають прямокутний перетин.

У них укладають двошарові обмотки. Корпуси статорів СМ великої потужності роблять рознімними для зручності транспортування та збірки.

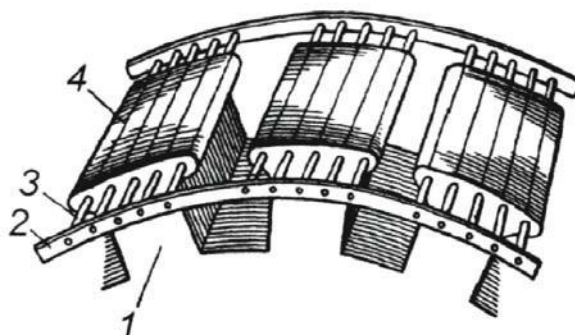
Ротори багатополюсних синхронних машин мають явнополюсну будову (рис. 11.3). Кожен полюс виконується у вигляді окремого вузла, що складається із осердя, полюсного наконечника та котушки збудження.



а – загальний вигляд; 1 – вал; 2 – роторна зірка; 3 – обід; 4 – обмотка збудження; б – осердя полюса

Рисунок 11.3 - Ротор явнополюсної синхронної машини:

Обмотку збудження у великих машинах для кращого охолодження виконують з неізолюваних мідних шин великого перетину, намотаних на ребро. Між сусідніми витками укладають ізоляційні прокладки. Котушку запікають і встановлюють на полюсі, на якому по периметру попередньо наносять корпусну ізоляцію. У машинах невеликої потужності котушки обмотки збудження виконують з ізолюваних провідників прямокутного чи круглого перетину.



1 – полюс; 2 – короткозамкнене кільце; 3 – демпферна обмотка; 4 – пази
Рисунок 11.4 - Демпферна обмотка:

Полюси кріпляться до обода (3) ротора (рис. 11.3 ,а). Обід ротора є ярмом, по якому замикаються потоки полюсів. Полюси кріпляться до

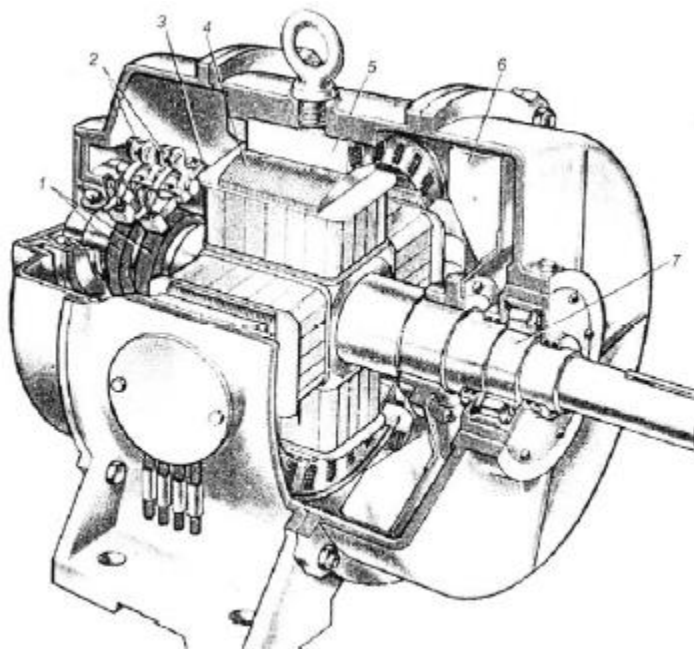
обода за допомогою хвостів, які мають форму ластівчиного хвоста (рис. 11.3 ,б) чи Т-подібну форму.

У пазах (4) полюсних наконечників (1) розташовується стержнева демпферна обмотка (3) (рис. 11.4). Стержні обмотки виготовляють з міді чи латуні. По торцях стержні замикають пластинами чи кільцями так, щоб утворилася короткозамкнена клітка (2).

Демпферна обмотка виконує ряд функцій. У генераторах вона послабляє вплив несиметричного навантаження і знижує амплітуду коливань ротора. У двигунах вона є пусковою обмоткою і також знижує амплітуду коливань ротора при пульсації навантаження.

Нормальною для явнополюсних синхронних машин є будова з горизонтальним валом.

Таку будову мають переважна частина синхронних двигунів, синхронні компенсатори і генератори, призначені для з'єднання з двигунами внутрішнього згоряння (дизель-генератори). Дизель-генератори мають частоту обертання від 600 до 1500 об/хв.

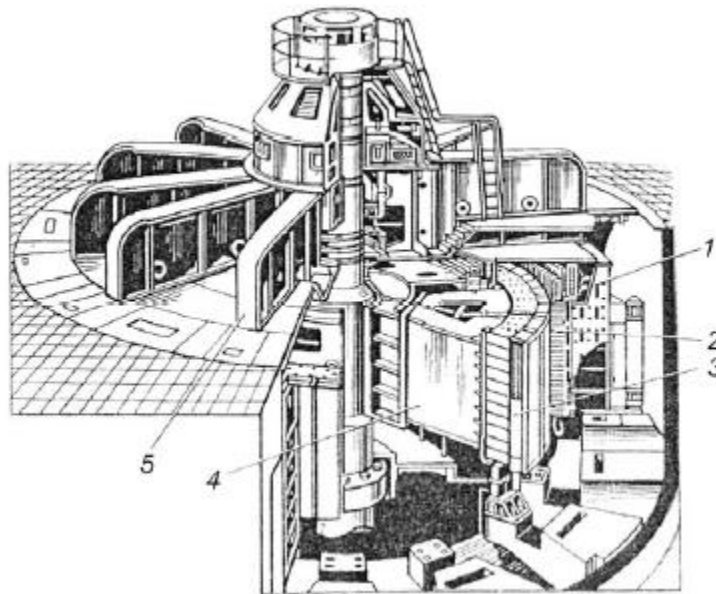


1 – контактне кільце; 2 – щіткотримач; 3 – полюсна котушка; 4 – полюсний наконечник; 5 – осердя статора; 6 – вентилятор; 7 – вал

Рисунок 11.5 - Дизель-генератор:

Між зовнішньою поверхнею полюсного наконечника і внутрішньою поверхнею осердя статора є повітряний зазор δ . По осі полюса цей зазор мінімальний, а на краях має максимальне значення δ_{max} (рис. 11.5). Така конфігурація полюсного наконечника необхідна для синусоїдального розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі.

Великі гідрогенератори звичайно виконуються з вертикальним розташуванням вала (рис. 11.6). Приводним двигуном при цьому є гідравлічна турбіна. Гідравлічна турбіна розвиває невелику частоту обертання



1 – корпус статора; 2 – осердя статора; 3 – полюси ротора;
4 – обід ротора; 5 – хрестовина
Рисунок. 11.6 - Гідрогенератор.

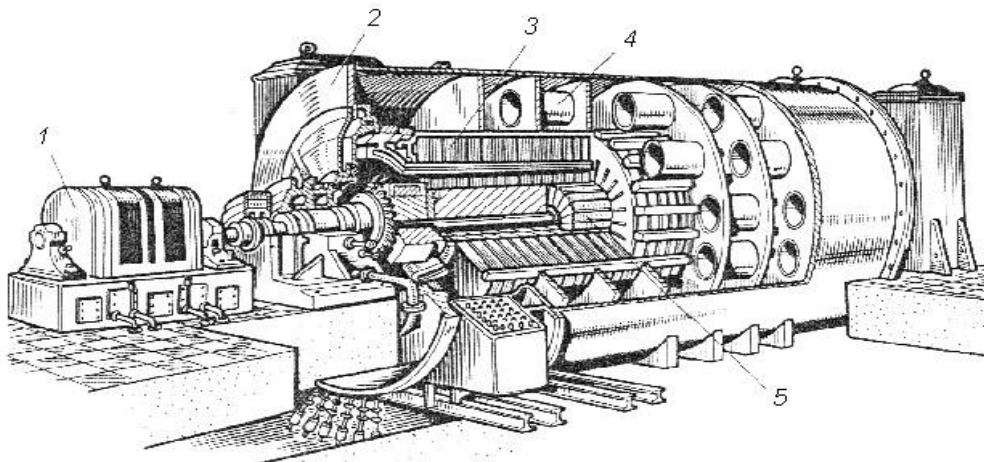
Для того щоб при таких частотах обертання одержати змінну напругу частотою 50 Гц, гідрогенератор повинен мати велике число полюсів.

Самі потужні гідрогенератори в даний час побудовані мають потужність 715 МВА при частоті обертання 143 об/хв. Зовнішній діаметр гідрогенераторів складає близько 15 м, діаметр його ротора – близько 12 м, довжина магнітопровода статора 2,75 м, число полюсів $2p = 2$.

Неявнополюсні синхронні машини

Синхронні генератори, що приводяться в обертання швидкохідними паровими турбінами, називають турбогенераторами (рис. 11.7).

Технічні показники парової турбіни зі збільшенням частоти обертання поліпшуються. Тому турбогенератори звичайно виконуються двополюсними.



1 – збудник; 2 – корпус; 3 – осердя статора; 4 – секції водневого охолодження; 5 – ротор

Рисунок 11.7 - Турбогенератор:

З метою одержання великої механічної міцності ротор турбогенераторів виконується неявнополюсним. При такому виконанні величина повітряного зазора однакова по всьому колу статора. Ротор виточується з цільної сталевий заготовки та має вигляд масивного циліндра (рис. 11.8 ,а).

У роторі фрезерують пази (рис. 11.8 ,б) для розміщення в них витків обмотки збудження. Приблизно третя частина полюсного ділення залишається вільною від пазів і утворюється так називаний великий зуб, через який проходить головна частина магнітного потоку полюсів.

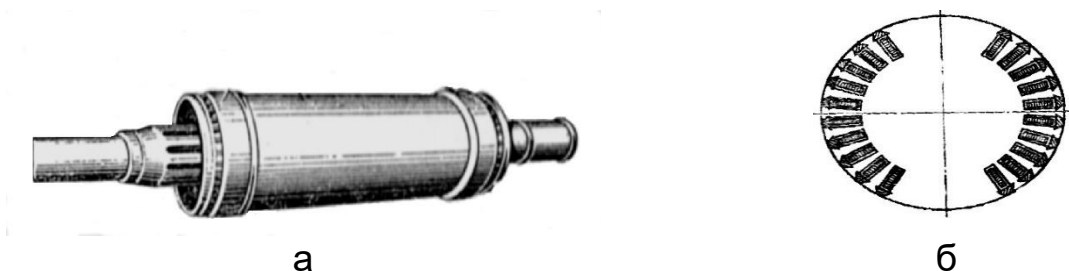


Рисунок 11.8 - Загальний вигляд ротора турбогенератора –а та поперечний розріз ротора –б

Обмотку збудження, покладену у вигляді концентричних котушок у пази ротора, кріплять за допомогою клинів. Клини виконують з немагнітної сталі для ослаблення магнітного потоку розсіювання паза. Лобові частини обмотки збудження закривають бандажними кільцями, виконаними з немагнітної сталі.

Крім турбогенераторів з неявнополюсним ротором, випускають швидкохідні синхронні двигуни великої потужності – турбодвигуни.

Збудження синхронних машин

У СМ застосовуються два способи збудження: електромагнітне та збудження від постійних магнітів. Основним способом збудження є електромагнітне. До останнього часу для живлення обмотки збудження (ОЗ) застосовувалися генератори постійного струму незалежного збудження, називані збудниками. ОЗ збудника живиться від іншого генератора постійного струму паралельного збудження, називаного підзбудником (рис. 11.9,а).

Ротор синхронної машини, якоря збудника (З) і підзбудника (ПЗ) розташовуються на спільному валу й обертаються одночасно. Струм в ОЗ синхронної машини подається через контактні кільця та щітки. Для регулювання струму збудження СМ у колі збудження збудника і підзбудника вмикають регульовальні реостати r_1 та r_2 . У СМ середньої і великої потужності струм збудження регулюється автоматичним пристроєм. У СГ великої потужності застосовуються безконтактні системи електромагнітного збудження. Як збудник використовується генератор змінного струму (рис. 11.9,б), обмотка збудження якого (З) ввімкнена в коло якоря генератора постійного струму (ПС) паралельного збудження. Так як збудник є генератором змінного струму, то на вихід трифазної обмотки якоря вмикають

напівпровідниковий випрямляч (1), закріплений на валу синхронної машини. Відсутність контактів у колі ОЗ синхронної машини підвищує її експлуатаційну надійність.

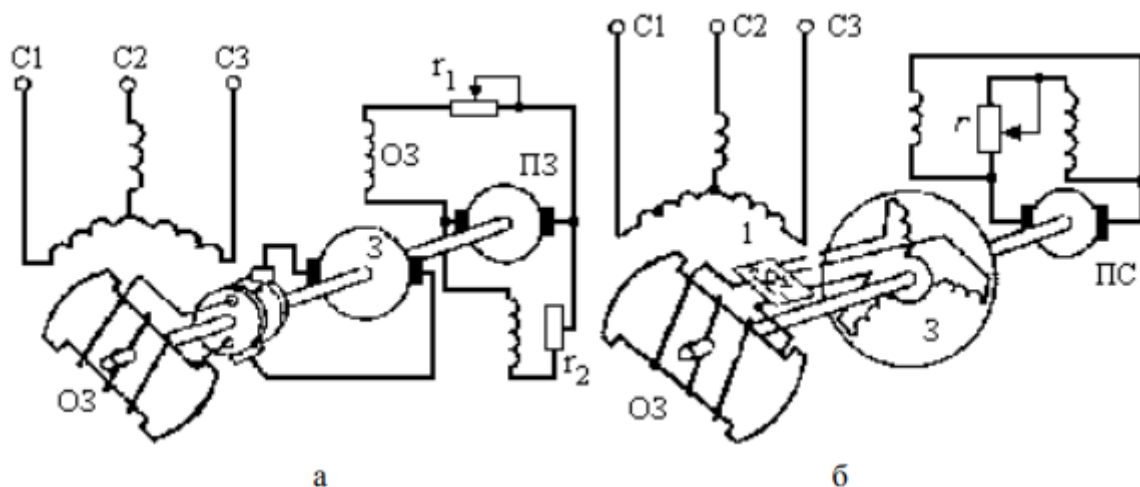


Рисунок 11.9 - Системи електромагнітного збудження СГ

У СГ має широке поширення принцип самозбудження, коли енергія змінного струму відбирається від обмотки статора (або від додаткової обмотки статора) та через понижуючий трансформатор і напівпровідниковий випрямляч (НВ) перетворюється в постійний струм, який додається до контактних кілець (рис. 11.10,а). Для реалізації принципу самозбудження необхідна наявність залишкового магнітного потоку. На рис. 11.10,б представлена принципова схема автоматичної системи збудження СГ із випрямним трансформатором (ВТ) і тиристорним перетворювачем (ТП).

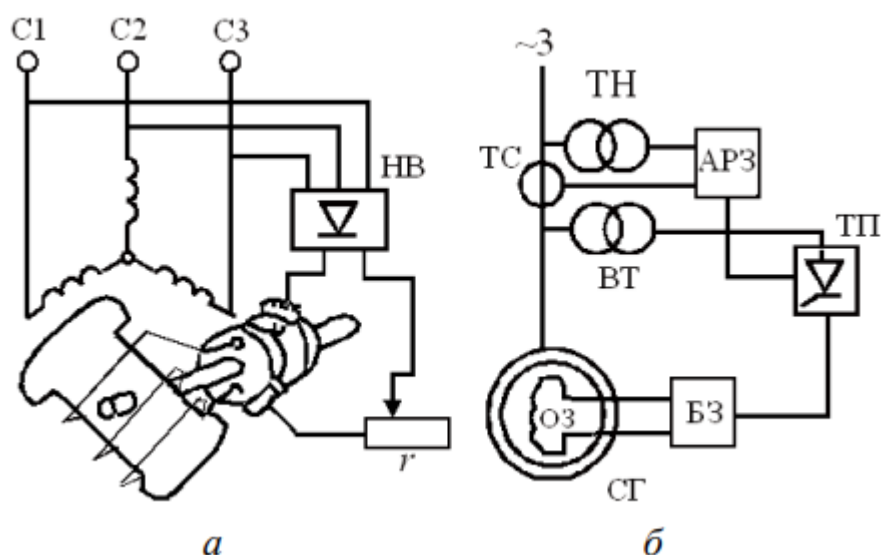


Рисунок 11.10 - Схема самозбудження СГ

Енергія змінного струму з кола статора передається (після перетворення в постійний) в обмотку збудження (ОЗ) через блок захисту (БЗ) обмотки збудження і тиристорного перетворювача. Управління тиристорним

перетворювачем здійснюється автоматичним регулятором збудження (АРЗ), на вхід якого подаються сигнали напруги СГ через трансформатор напруги (ТН) і струму навантаження через трансформатор струму (ТС).

Висновки.

1. Синхронні машини забезпечують фіксовану швидкість обертання, визначену частотою мережі, тому широко застосовуються у великих енергетичних установках.
2. Режими роботи СМ дозволяють регулювати активну та реактивну потужність, що робить їх ефективними компенсаторами.
3. Конструкція роторів значною мірою визначається частотою обертання: явнополюсні — для низьких швидкостей, неявнополюсні — для високих.
4. Системи збудження (електромагнітні, безконтактні, самозбудження) забезпечують стабільну роботу в усіх режимах та підвищують надійність.
5. Синхронні генератори є основним типом генераторів на електростанціях, забезпечуючи більшу частину вироблення електроенергії.

Контрольні питання.

1. Які ознаки визначають синхронну електричну машину?
2. Чим принципово відрізняється синхронна машина від асинхронної?
3. Яким чином визначається синхронна частота обертання?
4. Які режими роботи характерні для синхронної машини?
5. Що таке кут навантаження синхронної машини?
6. Які функції виконує обмотка збудження?
7. Які конструктивні відмінності мають явнополюсні та неявнополюсні ротори?
8. Яка роль демпферної обмотки?
9. У чому полягає принцип самозбудження синхронного генератора?
10. Яким чином реалізується безконтактне збудження?
11. Які режими реактивної потужності можливі у синхронному двигуні?
12. Що показують V-подібні характеристики?
13. Чому синхронний двигун не може стартувати самостійно?
14. У чому суть асинхронного пуску СД?
15. Які вимоги висуваються до обмотки збудження під час асинхронного пуску?
16. Що визначає момент входу в синхронізм?
17. Де найчастіше застосовуються синхронні генератори?
18. Чому турбогенератори виконуються неявнополюсними?
19. Що впливає на число полюсів гідрогенераторів?

Використана література.

1. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
2. Гайденко Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
3. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
4. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331с.

ТЕМА 12. СИНХРОННІ ГЕНЕРАТОРИ

Магнітне поле синхронних генераторів. Робота трифазних синхронних генераторів при симетричному навантаженні. Характеристика холостого ходу, навантажувальна, зовнішня та регульовальна характеристики. Робочі характеристики синхронних генераторів при різному характері навантаження. Паралельна робота синхронних генераторів. Умови вмикання генераторів на паралельну роботу. Способи синхронізації. У-подібні характеристики синхронного генератора. Регулювання реактивної потужності синхронних генераторів. Висновки.

Магнітне поле синхронних генераторів

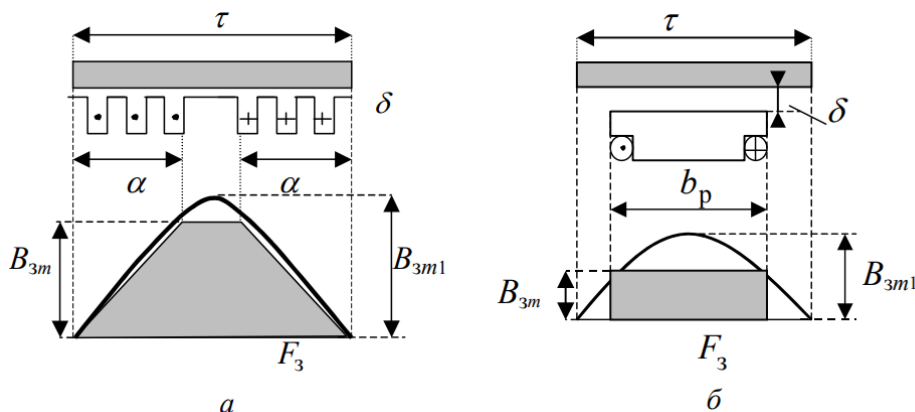
У режимі неробочого ходу синхронної машини, тобто за відсутності струму в обмотці статора ($I_1 = 0$), магнітне поле створюється тільки МРС обмотки збудження (F_3).

Форма магнітного поля збудження в зазорі визначається конструкцією ротора. Амплітуда основної гармоніки цього поля B_{3m1} визначається коефіцієнтом форми поля збудження

$$k_f = \frac{B_{3m1}}{B_{3m}},$$

де B_{3m} - найбільше значення дійсного розподілу магнітної індукції поля збудження.

На рис. 12.1,а показаний розподіл магнітного поля збудження $B_3(x)$ у повітряному зазорі в межах одного полюсного ділення для неявнополюсної машини. Цей розподіл носить трапецієвидний характер і залежить від відношення обмотаної частини полюса ротора до полюсного ділення $\gamma = 2 \cdot \alpha / \tau$. Звичайно $\gamma = 0,67 \dots 0,8$.



а – неявнополюсна, б - явнополюсна синхронна машина

Рисунок 12.1 - Магнітні поля збудження синхронної машини в залежності від виконання ротору

Для неявнополюсного ротора коефіцієнт форми поля збудження визначається за виразом

$$k_f = 8 \cdot \sin \gamma \cdot 90^\circ / (\pi^2 \cdot \gamma).$$

За відсутності насичення $k_f = 1065/0,965$.

У неявнополюсній машині поліпшення форми поля збудження досягається вибором співвідношення між частинами полюсного ділення, що має і не має обмотки. Найменший склад вищих гармонік магнітного поля має місце при $\gamma = 2 \cdot \alpha / \tau = 0,75$.

При $\alpha = \frac{\pi}{3}$ в кривій магнітної індукції будуть відсутні гармоніки, кратні трьом.

На рис. 12.1,б показаний розподіл індукції $B_\delta(x)$ для явнополюсної синхронної машини при незмінному повітряному зазорі під полюсним наконечником ($\delta = const$), що являє собою прямокутник.

Форма кривої розподілу індукції в зазорі явнополюсної СМ і коефіцієнт форми поля збудження к залежать від співвідношень b_p/τ і δ_{max}/δ . Наприклад, при $b_p/\tau = 0,65 \div 0,75$ і $b_p/\tau = 1 \div 2,5$ величина $k_f = 0,95 \div 1,15$

Для наближення кривої поля збудження до синусоїди полюсні наконечники скошують, тобто збільшують повітряний зазор під краями полюсів. Звичайно $\delta_{max}/\delta = 1,5 \div 2,0$.

Цілком синусоїдального розподілу поля збудження досягти неможливо. Тому поле збудження можна розкласти на основну та вищі гармоніки, що індукують в обмотці якоря, відповідно, основну та вищі гармоніки ЕРС. Вищі гармоніки ЕРС невеликі, тому що малі гармоніки поля. Крім того, вибором кроку та числа я обмотки якоря досягається ще більше зменшення вищих гармонік ЕРС. Тому в теорії синхронних машин враховується основна гармоніка ЕРС, а потік першої гармонійної магнітного поля збудження Φ_3 називають потоком взаємоіндукції між ротором та якорем.

Магнітне поле якоря.

При підмиканні навантаження в кожній фазі обмотки якоря виникає змінний струм I_1 , що створює МРС якоря F_a і магнітне поле якоря Φ_a , що обертається синхронно з ротором. У неявнополюсній синхронній машині повітряний зазор рівномірний ($\delta = const$), і тому просторове положення вектора МРС якоря F_a відносно осі полюсів ротора не впливає на величину і графік розподілу індукції поля якоря. У явнополюсній синхронній машині повітряний зазор нерівномірний (рис. 12.2), і поле якоря поділяють на поле якоря по поздовжній осі Φ_d та поле якоря по поперечній осі Φ_q .

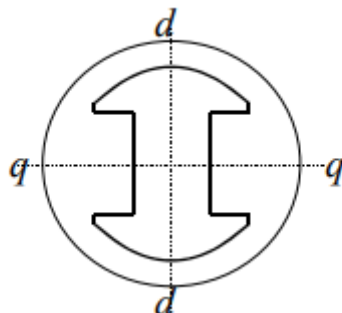


Рисунок 12.2 - Вісі d, q у явнополюсній СМ

Магнітний опір потоку якоря Φ_d по поздовжній осі d-d значно менше від магнітного опору потоку якоря Φ_q по поперечній осі q-q. Тому величина і характер розподілу індукції магнітного поля якоря в повітряному зазорі залежить від просторового положення вектора МРС F_a чи від його складових.

Нижче подано розпізнаний текст із зображення з максимально можливим збереженням формул, позначень і структури.

$$F_d = F_a \cdot \sin \psi, \quad F_q = F_a \cdot \cos \psi,$$

де $F_a = 1,35 \cdot I_1 \cdot w_1 \cdot k_{обл}/p$ — амплітудне значення МРС якоря,

ψ — кут між векторами струму $\vec{I}_1$ та ЕРС неробочого ходу $\vec{E}_0$.

Максимум хвилі МРС F_d збігається з подовжною, а максимум хвилі МРС F_q — з поперечною віссю. Якби величина зазора по всьому колу була однакова і дорівнювала його значенню під серединою полюса, то $F_d(x)$ і $F_q(x)$ (криві 1 на рис. 12.3, а, б) створили б синусоїдальні хвилі магнітного поля з амплітудами (криві 2 на рис. 12.3, а, б):

$$B_{dm} = \frac{\mu_0}{\delta \cdot k_\delta \cdot k_{\mu d}} \cdot F_d,$$

$$B_{qm} = \frac{\mu_0}{\delta \cdot k_\delta \cdot k_{\mu q}} \cdot F_q,$$

де $k_{\mu d}, k_{\mu q}$ — коефіцієнти насичення магнітного кола по осях (d) і (q).

У дійсності внаслідок нерівномірного повітряного зазору криві індукції $B_d(x)$ та $B_q(x)$ (криві 3 на рис. 12.3, а, б), створювані синусоїдальними хвилями МРС, будуть несинусоїдальні.

Дійсні криві $B_d(x)$ та $B_q(x)$ можна розкласти в гармонійний ряд і зобразити перші гармоніки індукції магнітного поля з амплітудами B_{dm1} і B_{qm1} (криві 4 на рис. 12.3, а, б). Нерівномірність повітряного зазору приводить до зменшення амплітуд основних гармонік поля якоря.

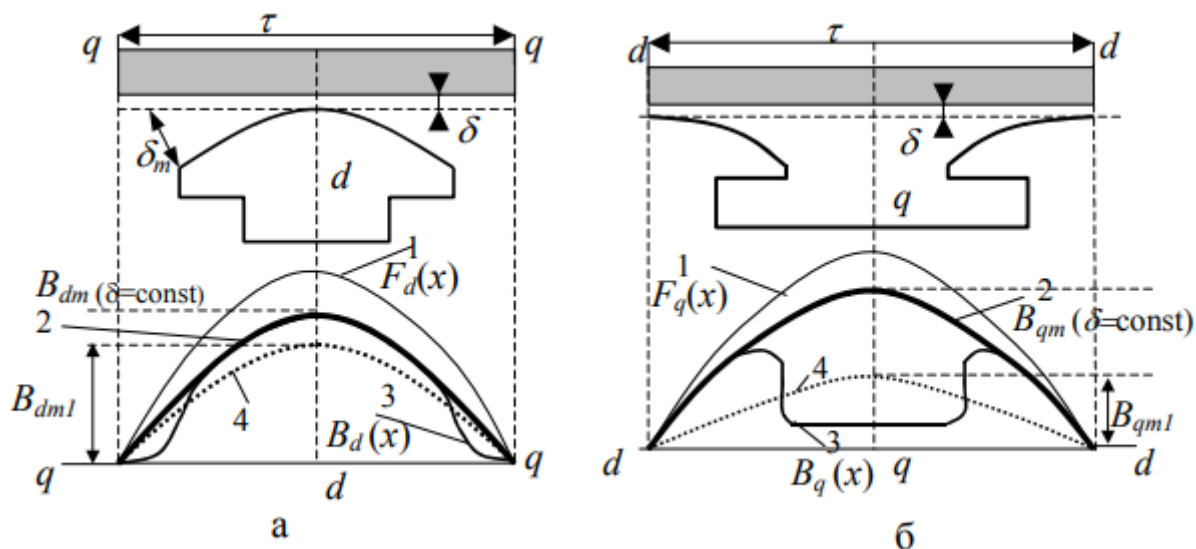


Рисунок 12.3. - Магнітні поля якоря явнополюсної СМ по осях d і q

Коефіцієнти форми магнітного поля якоря по подовжній і поперечній осях визначаються за такими виразами:

$$k_{ad} = \frac{B_{dm1}(\delta = \text{var})}{B_{dm}(\delta = \text{const})}; \quad k_{aq} = \frac{B_{qm1}(\delta = \text{var})}{B_{qm}(\delta = \text{const})}.$$

Ці коефіцієнти визначають ступінь зменшення амплітуди основної гармоніки магнітного поля якоря, обумовлену нерівномірністю повітряного зазора.

Коефіцієнти k_{ad} і k_{aq} залежать від співвідношень b_p/τ , $\delta_{\max}/\delta$ та δ/τ . У явнополюсних синхронних машинах $k_{ad} > k_{aq}$, у неявнополюсних — $k_{ad} = k_{aq}$.

Реакція якоря.

При роботі синхронної машини під навантаженням у ній діють дві МРС, що створюють два магнітних поля: поле збудження Φ_3 і поле якоря Φ_a .

Магнітні потоки збудження Φ_3 та якоря Φ_a взаємно нерухомі, і результуючий потік $\Phi_{\text{рез}}$ при навантаженні утворюється сумарною дією МРС обмотки збудження F_3 та МРС обмотки якоря F_a .

У синхронній машині МРС F_3 не залежить від навантаження, тому результуючий потік у режимі навантаження істотно відрізняється від потоку в режимі неробочого ходу.

Вплив МРС якоря на результуюче магнітне поле синхронної машини називають реакцією якоря.

Вплив реакції якоря (на відміну від машин постійного струму) залежить не тільки від величини струму якоря, але і від характеру навантаження. Розглянемо спочатку реакцію якоря при чисто активному навантаженні ($Z_H = R_H$, $\psi = 0$). Припустимо, що по обмотці збудження протікає струм I_3 такого напрямку, як показано на рис. 12.4, а.

Ротор СГ обертається з частотою $n = n_1$. При обертанні ротора максимальне значення ЕРС $E_{0\max}$ наводиться полем збудження в провідниках обмотки якоря, що знаходяться в розглянутий момент часу під серединою полюсів ротора на осі d . Напрямок ЕРС $E_{0\max}$, що наводиться, визначається за правилом правої руки. Якщо до обмотки статора підключене активне навантаження, то струм $I_{1\max}$ збігається за фазою з індукованою ЕРС $E_{0\max}$.

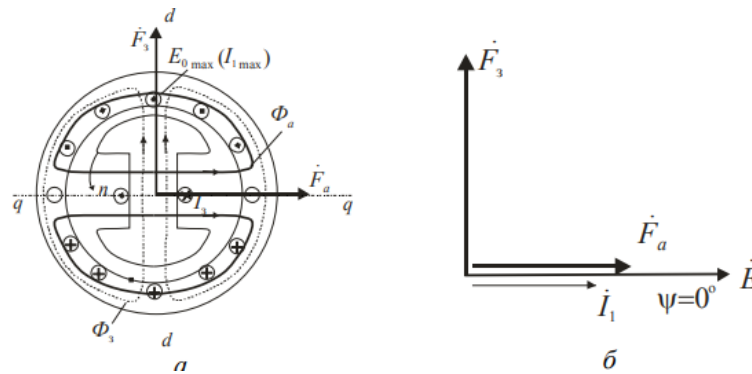


Рисунок 12.4. - Реакція якоря при чисто активному навантаженні

Вектор МРС обмотки статора F_a завжди буде спрямований по осі тієї фази, в якій у даний момент часу струм I_1 максимальний.

Побудувавши силові лінії поля збудження Φ_3 і поля якоря Φ_a , дістаємо, що вектор МРС F_a спрямований по осі q (рис. 12.4, а) і **реакція якоря є поперечною**.

На рис. 12.4, б побудована часова векторна діаграма. Вектор ЕРС $\vec{E}_0$ відстає від МРС збудження F_3 на 90° електричних. При активному навантаженні струм якоря збігається за фазою з ЕРС, а вектор МРС якоря $\vec{F}_a$ збігається за фазою зі струмом $\vec{I}_1$. Таким чином, вектор МРС якоря $\vec{F}_a$ відстає від вектора МРС F_3 на 90° електричних.

Така взаємодія МРС F_3 та F_a аналогічна реакції якоря в машинах постійного струму при щітках, установлених на лінії геометричної нейтралі.

При чисто індуктивному навантаженні при $Z_H = X_L$ струм в обмотці якоря I_1 відстає в часі від індукованої полем збудження ЕРС $\vec{E}_0$ на кут $\pi/2$ (рис. 38.5, б).

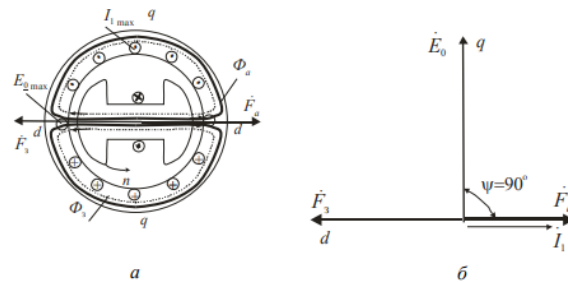


Рисунок 12.5. - Реакція якоря при чисто індуктивному навантаженні

При цьому, якщо $2p = 2$, то струм досягає свого максимального значення $I_{1\max}$ тільки після повороту ротора вперед на просторовий кут $\pi/2$ відносно його колишнього положення, що відповідає максимуму ЕРС $E_{0\max}$ (рис. 12.5, а).

При цьому МРС F_a діє по осі полюсів ротора зустрічно МРС збудження F_3 . Така дія МРС якоря послаблює результуюче поле машини. Отже, **реакція якоря в СГ при чисто індуктивному навантаженні має подовжньо-розмагнічуючу дію**.

При чисто ємнісному навантаженні $Z_H = X_C$, $\psi = -\pi/2$ струм якоря випереджає за фазою ЕРС на кут $\pi/2$ (рис. 12.6, б).

$E_{0\max}$, тобто коли ротор займе положення, як на рис. 12.6, а.

МРС якоря F_a , так само як і в попередньому випадку, діє по осі d , але тепер уже згідно з полем збудження F_3 . При цьому відбувається посилення результуючого поля. **Реакція якоря при чисто ємнісному навантаженні СГ має подовжньо-намагнічуючу дію.**

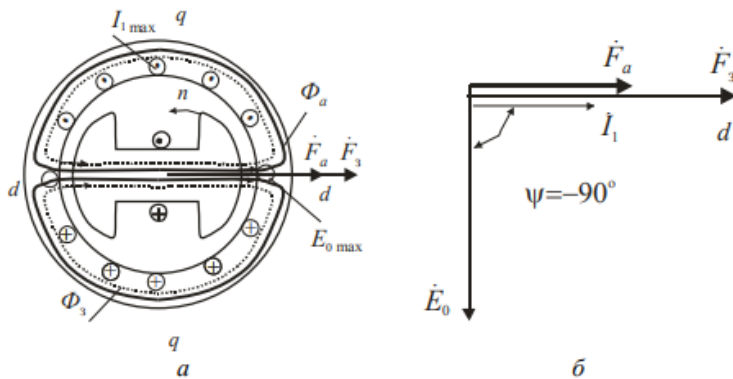


Рисунок 12.6. - Реакція якоря при чисто ємнісному навантаженні

У загальному випадку навантаження машини змішане. Якщо припустити, що навантаження $Z_H = R + jX_L$, то вектор MPC $\vec{F}_a$ відстає від вектора ЕРС $\vec{E}_0$ на кут ψ . Векторна діаграма для цього випадку наведена на рис. 12.7.

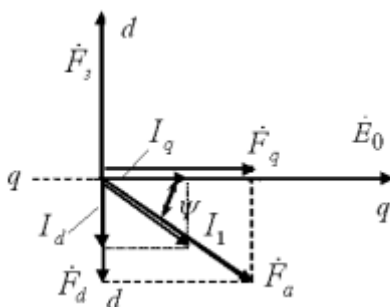


Рисунок 12.7 - Векторна діаграма MPC СГ при активно-індуктивному навантаженні

Дію реакції якоря слід розглядати по подовжній і поперечній осях окремо. Такий підхід називають **методом двох реакцій**.

Теорія двох реакцій заснована на принципі роздільного розгляду по-
довжніх і поперечних полів та подальшого їх накладання без врахування
впливу зміни насичення магнітного кола.

Вектор МРС якоря $\vec{F}_a$ розкладають по осях di q на подовжню і поперечну складові:

$$F_d = F_a \cdot \sin \psi ; F_g = F_a \cdot \cos \psi.$$

Дія складової F_d зведена до випадку чисто індуктивного чи чисто ємнісного навантаження. Складові F_d є подовжньою МРС реакції якоря і діє розмагнічуюче чи намагнічуюче, тобто послабляє або підсилює результуюче поле.

Дія МРС F_q зведена до випадку чисто активного навантаження. Складова F_q є поперечною МРС реакції якоря і впливає на поле, спотворюючи розподіл у повітряному зазорі порівняно з розподілом у режимі неробочого ходу.

Крім потоків збудження Φ_z та якоря Φ_a , при навантаженні СМ є потік розсіювання обмотки статора $\Phi_{\sigma 1}$. Цей потік зчеплений тільки з обмоткою статора і пропорційний струму цієї обмотки.

Характеристики синхронних генераторів при роботі на автономне навантаження.

Характеристики синхронних генераторів установлюють функціональну залежність між їхніми параметрами режиму – U , I і i_f – при $f = f_1 = \text{const}$ (або $n_1 = n_2 = \text{const}$) і $\cos\varphi = \text{const}$.

По кількості параметрів режиму їхньої взаємозалежності, як і в генераторах постійного струму, визначають три сімейства характеристик.

1. Навантажувальні характеристики: $U = f(I_f)$ при $I = \text{const}$.

Характеристика при $I = 0$ називається характеристикою холостого ходу.

2. Зовнішні характеристики: $U = f(I)$ при $i_f = \text{const}$.

3. Регульовальні характеристики: $i_f = f(I)$ при $U = \text{const}$.

Характеристика при $U = 0$ називається характеристикою короткого замикання.

Представимо кожен із цих характеристик.

Характеристика неробочого ходу.

Характеристика неробочого ходу (ХНХ) являє собою графік залежності напруги на виході генератора в режимі НХ $U_1 = E_0$ від струму збудження I_3 при $n_1 = \text{const}$.

ХНХ обумовлюється магнітними властивостями СМ та є однією з основних характеристик. ХНХ можна дістати чи з розрахунку магнітного кола машини, чи дослідним шляхом.

Схема вмикання СГ для зняття характеристики НХ наведена на рис. 12.8, а.

Якщо характеристики НХ різних СГ зобразити у відносних одиницях $E_0^* = f(I_3^*)$, то вони будуть мало відрізнятися від «нормальної» характеристики НХ (рис. 12.8, б).

«Нормальна» ХНХ побудована за середніми даними великої кількості реальних характеристик генераторів та використовується при розрахунках СГ.

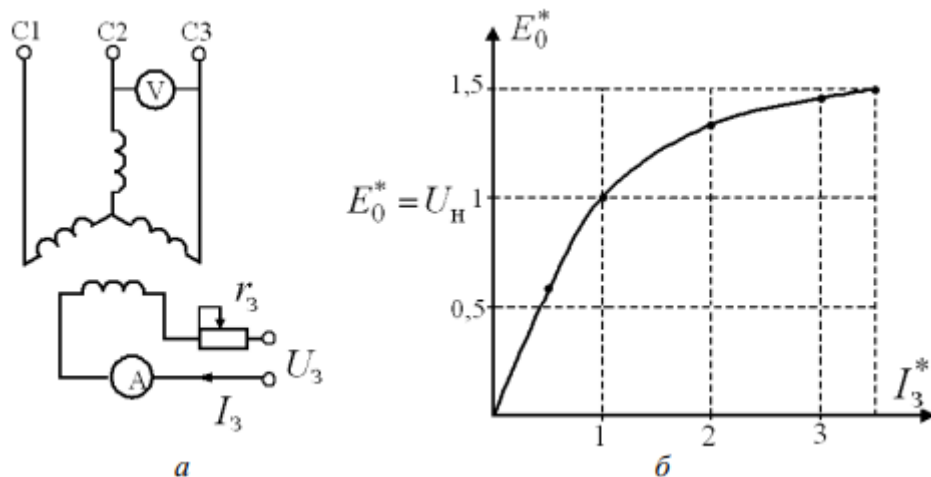


Рисунок 12.8 - Схема вмикання СГ у режимі НХ — а, «нормальна» ХНХ — б

Дані «нормальної» ХНХ наведені у табл. 12.1. У таблиці ЕРС та струм збудження наведені у відносних одиницях:

$$E_0^* = \frac{E_0}{U_H}, \quad I_{30}^* = \frac{I_{30}}{I_{30H}}.$$

Тут I_{30H} — струм збудження в режимі НХ при $E_0 = U_H$.

Таблиця 12.1 - Значення ЕРС та струму збудження для «нормальної» ХНХ

Струм збудження	I_3^*	0,45	1,0	1,45	2	2,45	3	3,45
Турбогенератори	E_0^*	0,458	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,451
Гідрогенератори	E_0^*	0,453	1,0	1,23	1,3	—	—	—

Характеристика короткого замикання.

Стале коротке замикання (КЗ) для випадку, коли всі три фази замкнуті безпосередньо на затискачах генератора (рис. 12.9, а).

Характеристика КЗ — це залежність сталого струму трифазного КЗ від струму збудження при постійній частоті обертання ротора: $I_k = f(I_3)$ при $n = \text{const}$ (рис. 12.9, б). При обертанні СГ струм збудження збільшують до значення, при якому струм КЗ перевищує номінальне значення струму статора не більше ніж на 25 %, тобто $I_k = (0 \div 1,25) I_{1H}$.

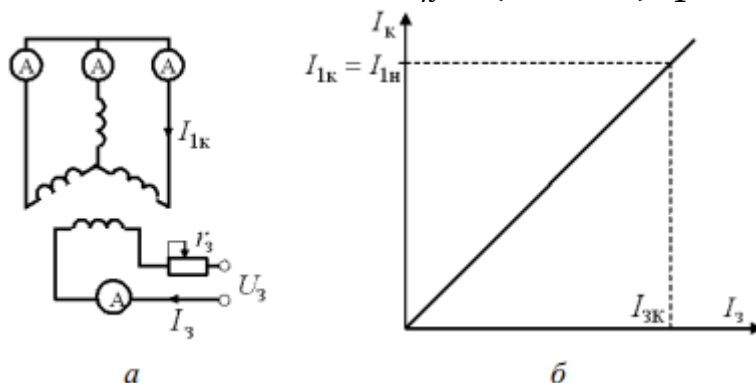


Рисунок 12.9 - Схема вмикання СГ у режимі КЗ — а; характеристика КЗ — б

Оскільки активний опір обмотки статора малий ($r_1 \approx 0$), то можна вважати, що при досліді КЗ обмотка якоря має тільки індуктивний опір та струм КЗ відстає від ЕРС на кут $\psi = 90^\circ$. Тому $I_q = 0$, $I_1 = I_d = I_k$ і реакція якоря буде подовжньо-розмагнічуючою.

Через дію реакції якоря, що розмагнічує, при короткому замиканні магнітне коло машини слабо насичене, і тому характеристика $I_k = f(I_3)$ являє собою лінійну залежність (рис. 12.9, б).

Рівняння електричної рівноваги (39.1) при $U = 0$ має вигляд:

$$0 = \vec{E}_0 + \vec{E}_{ad} + \vec{E}_{\sigma 1},$$

де $\vec{E}_{ad} = -jI_d x_{ad} = -jI_k x_{ad}$ — ЕРС подовжньої реакції якоря;

$\vec{E}_{\sigma 1} = -jI_1 x_1 = -jI_k x_1$ — ЕРС розсіювання.

З урахуванням останніх виразів рівняння (12.9) набирає вигляду:

$$\vec{E}_0 = jI_k x_{ad} + jI_k x_1 = jI_k x_d.$$

Цьому рівнянню відповідають векторна діаграма, показана на рис. 12.10, та схема заміщення — на рис. 12.11.

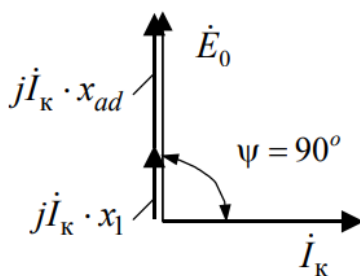


Рисунок 12.10 - Векторна діаграма СГ при трифазному КЗ

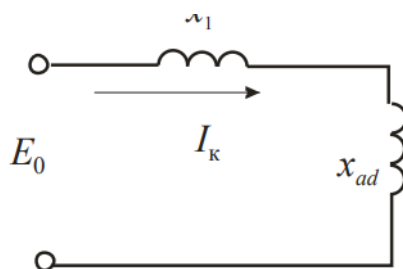


Рисунок 12.11 - Схема заміщення СГ при трифазному КЗ

Подовжній синхронний індуктивний опір x_d можна визначити за характеристиками НХ та трифазного КЗ. З векторної діаграми та схеми заміщення для режиму КЗ, наведених на рис. 12.10 та рис. 12.11:

$$x_d = \frac{E_0}{I_k},$$

де $x_d = x_{ad} + x_1$.

Звичайно знаходять ненасичене значення цього опору та позначають його $x_{d\infty}$.

Величину синхронного індуктивного опору звичайно виражають у відносних одиницях:

$$x_d^* = \frac{x_d}{Z_b} = \frac{x_d \cdot I_H}{U_H} = \frac{E_0 \cdot I_H}{U_H \cdot I_k} = \frac{E_0^*}{I_k^*},$$

де $E_0^* = \frac{E_0}{U_H}$, $I_k^* = \frac{I_k}{I_H}$ — відносні значення ЕРС неробочого ходу та струму короткого замикання.

При збільшенні насичення значення x_d зменшується.

Навантажувальна характеристика.

Навантажувальна характеристика являє собою залежність напруги на затискачах генератора від струму збудження $U_1 = f(I_3)$ при постійних значеннях струму якоря $I_1 = \text{const}$, коефіцієнта потужності $\cos \varphi = \text{const}$ та частоти обертання $n = \text{const}$.

Практичне значення має індукційна навантажувальна характеристика (ІНХ): $U_1 = f(I_3)$ при $\cos \varphi = 0$ для $I_1 = I_{1H} = \text{const}$ (рис. 40.6).

Навантажувальна характеристика розташовується нижче від характеристики НХ, тому що при однакових струмах збудження напруга на виході генератора в режимі навантаження менша за величину падіння напруги $I_H \cdot x_d$.

Точка A' перетину навантажувальної характеристики з віссю абсцис відповідає режиму трифазного короткого замикання при струмі якоря, при якому знята ІНХ, тобто $I_k = I_H$ при $U_1 = 0$.

За характеристиками НХ та індукційної навантажувальної (рис. 12.12) можна визначити насичене значення синхронного індуктивного опору x_d .

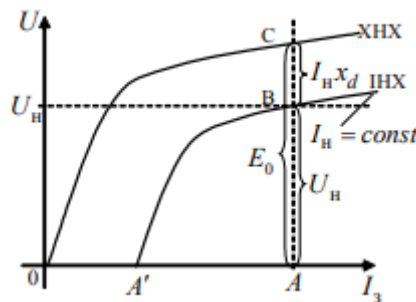


Рисунок 12.12. Індукційна навантажувальна характеристика СГ

Відповідно до рис. 12.12:

$$x_d = \frac{E_0 - U_H}{I_H}.$$

При знятті ІНХ у машині є тільки подовжня складова реакції якоря $F_{ad} = F_a \cdot \sin \psi$, тому що кут $\psi = 90^\circ$ та $F_{aq} = F_a \cdot \cos \psi = 0$.

Індукційна навантажувальна характеристика разом із НХ дозволяють визначити індуктивний опір розсіяння обмотки якоря x_1 .

Дослідна індукційна навантажувальна характеристика (ДІНХ) не збігається з розрахунковою ІНХ, а проходить нижче. Розбіжність між дослідною та розрахунковою характеристиками виникає через неточний облік при навантаженні потоку розсіяння обмотки збудження, що викликає підвищення насичення магнітної системи ротора.

Зовнішні характеристики

Зовнішня характеристика СГ — це залежність напруги генератора від струму навантаження $U_1 = f(I_1)$ при $I_3 = \text{const}$, $n = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.

Напруга на виході генератора не залишається постійною зі зміною навантаження. Це відбувається внаслідок падіння напруги на опорах обмотки якоря $I_1 \cdot r_1$, $I_1 \cdot x_1$ та впливу реакції якоря.

Зовнішні характеристики можуть бути зображені для випадку поступового збільшення навантаження чи для випадку поступового зняття навантаження. На рис. 12.13 зображені зовнішні характеристики для трьох значень $\cos \varphi$.

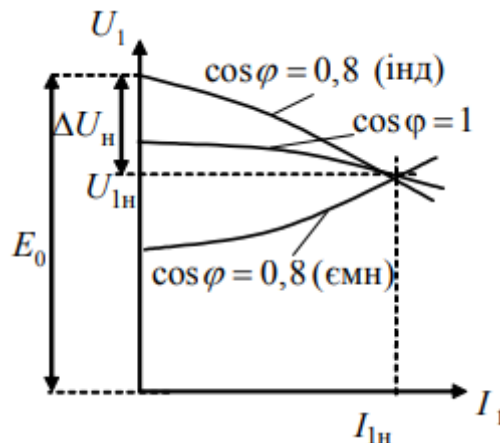


Рисунок 12.13 - Зовнішні характеристики СГ

Для всіх характеристик вихідною точкою була точка, що відповідає номінальній напрузі при номінальному струмі якоря. Струм збудження, що відповідає цій точці, надалі при зміні струму якоря підтримується незмінним.

При активно-індуктивному навантаженні струм якоря відстає від напруги, і реакція якоря має подовжньо-розмагнічуючу складову.

При скиданні навантаження напруга U_1 збільшується, тому що при зменшенні струму якоря зменшується подовжня розмагнічуюча складова реакції якоря:

$$F_{ad} = F_a \cdot \sin \psi.$$

При активному навантаженні ($\cos \varphi = 1$) також має місце складова подовжньо-розмагнічуючої реакції якоря, але кут ψ менше, ніж у попередньому випадку. Тому зростання напруги зі зменшенням струму навантаження менше.

У випадку активно-ємнісного навантаження СГ струм якоря випереджальний, і реакція якоря носить подовжньо-намагнічуючий характер. Тому при зменшенні струму якоря зменшується дія подовжньої реакції якоря, яка намагнічує, що приводить до зменшення напруги на затискачах генератора.

Зміну напруги при скиданні навантаження при $I_3 = I_{3н} = \text{const}$ та $n_1 = \text{const}$ визначають за виразом:

$$\Delta U_H = \frac{E_0 - U_{1н}}{U_{1н}} \cdot 100\%.$$

Регулювальні характеристики

Регулювальні характеристики — це залежності $I_3 = f(I_1)$ при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$, $n_1 = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.

Регулювальні характеристики показують, як треба регулювати струм збудження СГ, щоб при зміні навантаження напруга на затискачах генератора залишалася сталою.

Вид регулювальних характеристик (рис. 12.14) пояснюється характером дії реакції якоря.

Найбільше збільшення струму збудження необхідне при чисто індуктивному навантаженні, щоб компенсувати подовжньо-розмагнічуючу реакцію якоря.

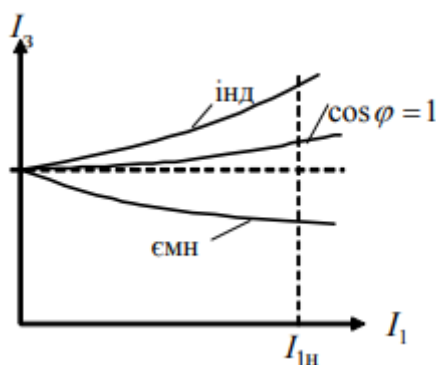


Рисунок 12.14 - Регулювальні характеристики СГ

При чисто ємнісному навантаженні зі зростанням струму якоря збільшується дія подовжньої реакції якоря, що намагнічує, що приводить до необхідності зменшення струму збудження СГ.

Паралельна робота синхронних машин

Включення синхронних генераторів на паралельну роботу

Паралельна робота синхронних генераторів із мережею — невід'ємна частина раціонального режиму експлуатації більшості електричних станцій. При паралельній роботі машин, установлених на станції, з'являється можливість гнучко йти за графіком навантаження — добовим, сезонним, річним, знижувати потужність аварійного та ремонтного резервів.

При підмиканні СГ у мережу на паралельну роботу необхідно дотримуватися таких умов:

- ЕРС СГ E_0 у момент вмикання повинна дорівнювати за величиною та бути протилежною за фазою напрузі мережі, тобто $\vec{E}_0 = -\vec{U}_1$;
- частота ЕРС генератора f_r повинна дорівнювати частоті мережі f_c ;
- порядок проходження фаз генератора, що підмикається, повинен бути таким же, що й на затискачах мережі.

Приведення СГ у стан, що задовольняє перераховані умови, називається синхронізацією СГ.

При дотриманні цих умов генератор вмикається в мережу без поштовхів струму. Ввімкнути СГ на паралельну роботу із мережею можна способами точної синхронізації або самосинхронізації.

При зазначених умовах вектори напруг генератора й мережі збігаються й обертаються з однаковою частотою, різниці напруг між контактами вимикача при включенні генератора (рис. 12.15) рівні

$$\dot{U}_{GA} - \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{GB} - \dot{U}_{CB} = \dot{U}_{GC} - \dot{U}_{CC} = 0$$

і тому при включенні не виникає ніякого поштовху струму.

Спосіб точної синхронізації припускає чітке виконання перерахованих умов. Умови точної синхронізації виконуються таким чином:

- рівність напруг досягається шляхом регулювання струму збудження СГ;
- рівність частот – шляхом регулювання частоти обертання ротора генератора;
- збіг фаз та момент вмикання визначаються за синхроскопом.

Рівність напруг досягається регулюванням струму збудження генератора й контролюється за допомогою вольтметра. Зміна частоти й фази напруги СГ досягається зміною частоти обертання генератора. Правильність чергування фаз необхідно перевіряти тільки при першому включенні СГ після монтажу або збирання схеми. Збіг напруг по фазі контролюється за допомогою ламп, нульових вольтметрів або спеціальних синхроскопів, а в автоматичних синхронізаторах – за допомогою спеціальних вимірювальних елементів.

Неправильна синхронізація може викликати серйозну аварію. Дійсно, якщо наприклад, напруги U_r і U_c будуть у момент включення генератора на паралельну роботу зрушені по фазі на 180° , то це еквівалентно короткому замиканню при подвоєній напрузі ($\dot{U}_r - \dot{U}_c = 2 \cdot \dot{U}_c$). При такому включенні ударний струм може у два рази перевищити струм при звичайному короткому замиканні.

Для перевірки виконання умов синхронізації використовуються спеціальні прилади, називані синхроскопами. Найпростішим з них є ламповий прилад.

Синхронізація за допомогою лампового синхроскопа може здійснюватися за схемою на загасання або на обертання світла. Схема синхронізації на загасання світла представлена на рис. 12.15, а, де ліворуч зображений генератор Γ_1 уже працюючий на шини станції й мережі, а праворуч – генератор Γ_2 , що включається на паралельну роботу, з

вольтметром V , перемикачем Π вольтметра й з ламповим синхроскопом C , кожна з ламп 1, 2, 3 яког включена між контактами однієї й тієї ж фази або полюса вимикача B_2 . При дотриманні приведених раніше умов і рівності напруги на всіх лампах одночасно дорівнюють нулю й лампи не світяться, що вказує на можливість включення генератора Γ_2 за допомогою вимикача B_2 на паралельну роботу.

Досягти точної рівності частот $f_r = f_c$ протягом навіть невеликого проміжку часу практично неможливо, і тому напруги $U_r - U_c$ на лампах 1, 2, 3 (рис. 12.15, а) пульсують із частотою $f_r - f_c$ (рис. 12.16), і якщо ця частота мала, то лампи загоряються й погасають із такою ж частотою.

Частота $f_r - f_c$ відповідає частоті пульсацій напруги (пунктирні криві на рис. 12.16, б). Регулюванням частоти генератора необхідно домогтися того, щоб частота загорання й загасання ламп була мінімальна (період 3 – 5 с), і зробити потім включення вимикача B_2 у той момент часу, коли лампи не горять.

При малій частоті загасання лампи гаснуть раніше, ніж напруга досягне нуля, і загоряються також при $U > 0$. Тому, якщо реалізується схема, зображена на рис. 12.15, а, важко вибрати правильний момент включення. Щодо цього кращою є схема на рис. 12.15, б, у якій лампа 1 включена так само, як на схемі, приведеної на рис. 12.15, а, а лампи 2 і 3 – між різними фазами генератора й мережі. Тому в цьому випадку при дотриманні перерахованих раніше умов і рівності лампа 1 не світиться, а лампи 2 і 3 перебувають під лінійною напругою й світяться з однаковою яскравістю, що і є критерієм правильності моменту включення. При $f_r - f_c \neq 0$ лампи 1, 2 і 3 (рис. 12.15, б) загоряються й гаснуть по черзі, і створюється враження обертального світла, причому при $f_r > f_c$ обертання відбувається в одну сторону, а при $f_r < f_c$ – в іншу. Частота обертання дорівнює $f_r - f_c$, і необхідно домогтися того, щоб вона була мінімальна (період 3 – 5 с).

Відзначимо, що якщо при реалізації схеми, приведеної на рис. 12.15, а, замість одночасного загасання й загорання всіх трьох ламп вийде обертання світла, а при реалізації схеми, зображеної на рис. 12.15, б, – одночасне загасання й загорання ламп, це буде вказувати на неправильність чергування фаз СГ і мережі. При цьому необхідно поміняти місцями початки двох фаз обмотки статора СГ. Для більш точного вибору моменту включення паралельно однієї з ламп (рис. 12.15, а) включають нульовий вольтметр, що має розтягнуту шкалу в області нуля.

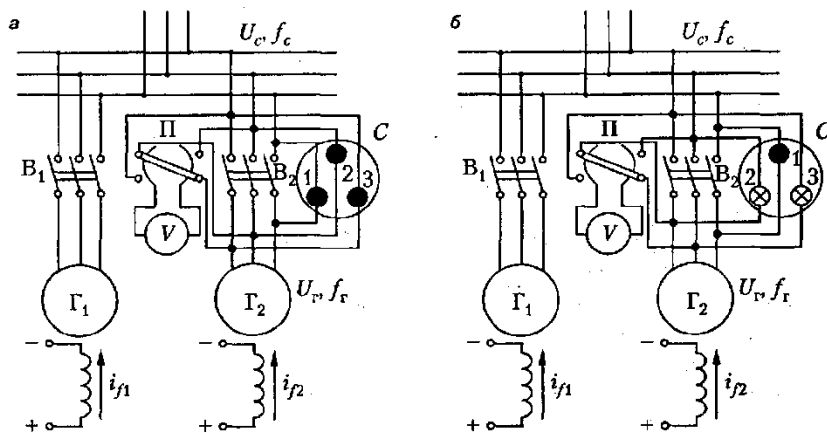


Рисунок 12.15 – Схеми синхронізації генератора за допомогою лампових синхроскопів з включенням: а – на загасання й б – на обертання світла

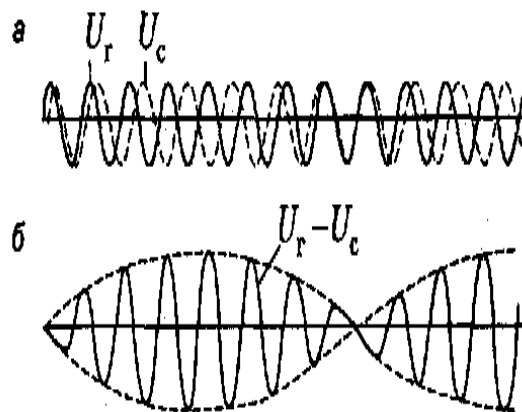


Рисунок 12.16 – Криві зміни за часом напруг: а – генератора, б – мережі й ламп ($U_r - U_c$) при нерівності частот мережі й генератора

Інші методи синхронізації. Синхронізація за допомогою ламп і нульового вольтметра застосовується тільки у випадку використання генераторів малої потужності. Для потужних генераторів використовують електромагнітний синхроскоп, до якого подаються напруги генератора й мережі. Цей прилад працює на принципі обертового магнітного поля, і при $f_r \neq f_c$ його стрілка обертається із частотою $f_r - f_c$ у ту або іншу сторону залежно від того, яка частота більше. Якщо момент включення обраний правильно, стрілка синхроскопа звернена вертикально вгору.

При високій напрузі прилади синхронізації включаються через трансформатори напруги. У цьому випадку необхідно подбати про те, щоб фазування (чергування фаз) цих трансформаторів була правильною.

Синхронізація генераторів є досить відповідальною операцією й вимагає від експлуатаційного персоналу великої уваги. Для виключення помилок персоналу й полегшення його роботи користуються автоматичними синхронізаторами, які автоматично регулюють U_r і f_r синхронізуємих генераторів у потрібних напрямках і при досягненні необхідних умов автоматично включають генератори на паралельну роботу.

Щоб спростити процедури включення, умови синхронізації іноді виконуються приблизно. Таке включення називається грубою синхронізацією.

Частіше включення на паралельну роботу роблять по методу самосинхронізації. Сутність самосинхронізації полягає в тім, що генератор включається в мережу в незбудженому стані ($U_r = 0$) при частоті обертання, близької до синхронної (допускається відхилення до 2 %). При цьому відпадає необхідність у точному вирівнюванні частот, величини й фази напруг, завдяки чому процес синхронізації гранично спрощується й можливість помилкових дій виключається. Після включення незбудженого генератора в мережу негайно включається струм збудження й генератор втягується в синхронізм (тобто частота його обертання досягне синхронної роботи й $f_r = f_c$).

При самосинхронізації, як і при грубій синхронізації, неминуче виникнення значного поштовху струму. Тому такі методи включення застосовують у тих випадках, якщо поштовх струму не буде перевершувати припустимого значення, рівного звичайно $3,5 \cdot I_n$.

Синхронні режими паралельної роботи синхронних машин

Режим роботи синхронної машини в складі енергосистеми при синхронній частоті обертання називається синхронним. Розглянемо особливості цього режиму, вважаючи з метою спрощення аналізу, що енергосистема, до якої підключена розглянута машина, є нескінченно потужної, тобто в ній $U = \text{const}$ і $f = \text{const}$. Таку енергосистему надалі іноді будемо представляти у вигляді нескінченно потужного генератора, у якого внутрішні опори обмотки якорі дорівнюють нулю й, отже, $E_e = U$, а інерційна постійна нескінченно велика, так що його частота обертання завжди постійна. Умови роботи синхронної машини в складі потужної енергосистеми принципово відрізняються від умов автономної роботи, оскільки величина й частота напруги на затискачах розглянутої синхронної машини завжди, при будь-якому її навантаженні залишаються постійними. Розглянемо особливості синхронного режиму паралельної роботи, думаючи з метою спрощення, що генератор неявнополюсний і опір обмотки якоря $r_a = 0$. У цьому випадку струм якоря визначається простою залежністю

$$I = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{j \cdot x_d} = \frac{\Delta \dot{U}}{j \cdot x_d}$$

Зміна реактивної потужності. Режим синхронного компенсатора

Припустимо, що при включенні на паралельну роботу умови синхронізації збудженого генератора були дотримані в точності, тобто $\dot{U}_r = \dot{U}_c$ або $\dot{E} = \dot{U}_c = \dot{U}$. Тоді, відповідно до рівності, $I = 0$, тобто машина не прийме на себе ніякого навантаження.

При рівності активної потужності нулю перезбуджена СМ відносно мережі еквівалентна ємності, недозбуджена – індуктивності.

Синхронна машина, що не несе активного навантаження й завантажена реактивним струмом, називається синхронним компенсатором. Такі компенсатори застосовуються для підвищення коефіцієнта потужності й підтримки нормального рівня напруги в мережах. Якщо, наприклад, такий компенсатор установити в районі великого промислового навантаження й перезбудити його, то він буде постачати асинхронним двигунам промислових підприємств реактивну потужність, живильна мережа й генератори електричних станцій будуть повністю або частково розвантажені від цієї потужності, коефіцієнт потужності генераторів і мережі підвищиться, втрати потужності й спадання напруги в них зменшаться й напруга мережі у споживачів збережеться на нормальному рівні.

Зміна активної потужності. Режими генератора й двигуна

Для того щоб СМ, ввімкнена на паралельну роботу з мережею, прийняла на себе активне навантаження та працювала в режимі генератора, необхідно збільшити рушійний механічний момент M_1 на її валу

Зміна активної потужності синхронної машини, як це впливає з фундаментальних принципів електромеханічного перетворення енергії, можлива тільки при зміні механічної потужності на її валу. Збільшимо, наприклад рушійний механічний момент на її валу. Тоді рівність моментів на валу порушиться, ротор генератора прискориться, а вектор $\vec{E}$ почне випереджати вектор $\vec{U}$, між ними виникне деякий кут θ , називаний кутом навантаження. При цьому виникне струм I , що відстає від $\Delta \vec{U} = \vec{E} - \vec{U}$ на 90° , але який має активну й реактивну складові стосовно напруги $\vec{U}$. У результаті в мережу буде віддаватися активна потужність

$$P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi > 0,$$

одержувана в процесі електромеханічного перетворення механічної енергії, підведеної до валу машини. Кут навантаження θ буде збільшуватися доти, поки виникаючий гальмовий електромагнітний момент не зрівноважить механічний момент, прикладений до валу. По досягненні балансу моментів ротор знову почне обертатися із синхронною частотою обертання й наступить сталий режим синхронного генератора.

Таким чином, потужність на виході СГ при його паралельній роботі з мережею регулюється зміною обертаючого моменту первинного двигуна.

Якщо ротор генератора пригальмувати, створивши на його валу механічне навантаження, то ЕРС $\vec{E}$ відстане від $\vec{U}$ на деякий кут θ , виникне струм I , при якому активна потужність $P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi < 0$ споживається з мережі. Машина буде працювати в режимі двигуна. Кут навантаження θ прийнято вважати позитивним у генераторному режимі й негативним – у руховому. Все викладене раніше буде вірно й для явнополюсної машини, з тією лише різницею, що векторні діаграми будуть трохи складніші.

Відзначимо деякі особливості паралельної роботи синхронних генераторів на мережу обмеженої потужності. Головна особливість такої роботи полягає в тім, що зміна режиму роботи одного генератора може

впливати на режим роботи інших генераторів. Тому всі процедури керування працюючим генератором, пов'язані зі зміною його струму збудження або механічного моменту на валу, можуть привести до помітних змін величини напруги й частоти в мережі й до дисбалансу генерованих активної й реактивної потужностей у системі.

Для того щоб забезпечити належну якість електричної енергії, генерованої в енергосистемі обмеженої потужності, необхідно одночасно й узгоджено виконувати необхідні процедури керування на всіх генераторах, що утворюють систему обмеженої потужності. Крім того, у таких системах може виявитися більше складною проблема забезпечення стійкості паралельної роботи генераторів.

Коливання синхронних генераторів

Припустимо, що СГ підімкнений до мережі і працює без навантаження. Для того щоб навантажити СГ, збільшимо обертаючий момент приводного двигуна, що відповідає куту навантаження θ_1 .

Однак під дією інерції обертючих частин ротор повернеться на кут $\theta_2 > \theta_1$.

Однак сили інерції перешкоджають ротору залишитися в положенні θ_1 , і кут θ_3 зменшиться до значення $\theta_3 < \theta_1$.

Під дією великого обертаючого моменту генератор навантажується і при цьому збільшується кут θ . Таким чином ротор буде робити коливальні рухи (хитання) біля середнього положення, що відповідає рівновазі.

Якби коливання не супроводжувалися втратою енергії, то вони були б незатухаючими.

Однак при коливаннях виникають втрати енергії, серед яких найбільше значення мають втрати в сталі, обумовлені вихровими струмами, що наводяться в роторі при коливанні його в магнітному полі статора. Взаємодія вихрових струмів у сталі ротора з магнітним полем статора утворює заспокійливу дію, що зменшує коливання ротора.

Отже, коливання ротора носять загасаючий характер. Значне зменшення коливань досягається при застосуванні демпферної (заспокійливої) обмотки, що укладається в пази полюсних наконечників явновиражених полюсів (рис. 12.17). Коливання ротора СГ, спричинені зміною обертаючого моменту приводного двигуна або електромагнітним моментом (через зміну навантаження), називають власними.

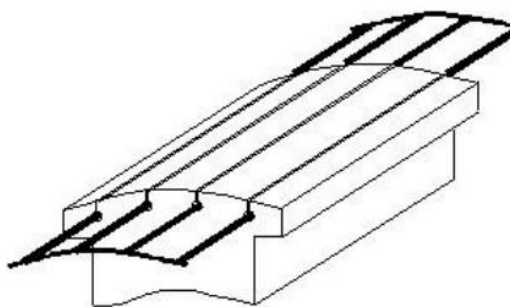


Рисунок 12.17 – Зовнішній вигляд демпферної обмотки

Висновки.

1. Синхронний генератор є основним джерелом електричної енергії в електроенергетичних системах і забезпечує вироблення електроенергії сталої частоти за умови синхронної частоти обертання ротора.
2. Магнітне поле синхронного генератора формується полем збудження ротора та полем якоря статора, взаємодія яких визначає електромагнітні процеси в машині.
3. Реакція якоря суттєво впливає на напругу, магнітний потік та режими роботи генератора і залежить від характеру навантаження (активного, індуктивного або ємнісного).
4. Основними експлуатаційними характеристиками синхронного генератора є характеристика холостого ходу, короткого замикання, навантажувальна, зовнішня та регульовальна характеристики.
5. Паралельна робота синхронних генераторів з мережею потребує обов'язкового виконання умов синхронізації за напругою, частотою та чергуванням фаз.
6. Регулювання активної потужності генератора здійснюється зміною механічного моменту первинного двигуна, а регулювання реактивної потужності — зміною струму збудження.
7. У режимі синхронного компенсатора синхронна машина може споживати або генерувати реактивну потужність без передачі активної, що використовується для підвищення коефіцієнта потужності мережі.
8. Коливання ротора синхронного генератора є динамічним явищем, яке впливає на стійкість паралельної роботи і зменшується за рахунок демпферних обмоток.

Контрольні питання.

1. Яке призначення синхронного генератора в електроенергетичних системах?
2. Які складові формують магнітне поле синхронного генератора?
3. У чому полягає фізична суть реакції якоря?
4. Як впливає характер навантаження на реакцію якоря синхронного генератора?
5. Чим відрізняються явнополюсні та неявнополюсні синхронні генератори?
6. Що характеризує характеристика холостого ходу синхронного генератора?
7. Яке призначення характеристики короткого замикання?
8. Що таке синхронний індуктивний опір і як його визначають?
9. Які фактори впливають на зовнішню характеристику генератора?
10. Для чого використовують регульовальні характеристики синхронного генератора?
11. Які умови необхідні для вмикання генератора на паралельну роботу з мережею?

12. У чому полягає різниця між точною синхронізацією та самосинхронізацією?
13. Як регулюється активна та реактивна потужність при паралельній роботі?
14. Що таке синхронний компенсатор і де він застосовується?
15. Які причини виникнення коливань ротора синхронного генератора?

Використана література.

1. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
2. Гайденок Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
3. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
4. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331с.

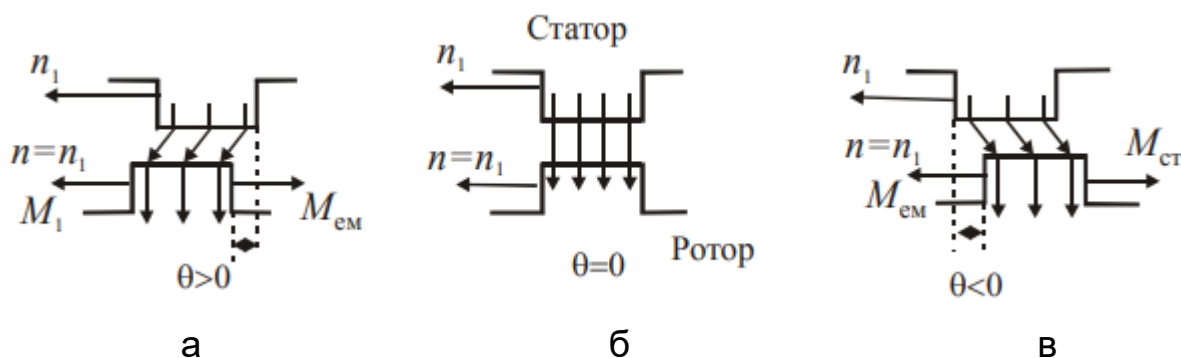
ТЕМА 13. СИНХРОННІ ДВИГУНИ

Улаштування та принцип дії синхронного двигуна. Пуск синхронних двигунів. U-подібні та робочі характеристики синхронного двигуна. Синхронні двигуни з постійними магнітами. Синхронні реактивні та вентильні двигуни. Синхронний компенсатор. Висновки.

Робота синхронної машини двигуном.

СМ при паралельній роботі з мережею може працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна.

У режимі генератора поле ротора є ведучим та випереджає поле статора на кут θ . На основі взаємозв'язку між просторовим положенням осі ротора і положенням вектора ЕРС E_0 можна зобразити векторну діаграму, на якій вектор ЕРС E_0 випереджає вектор напруги генератора U_1 на той же кут θ (рис. 13.1,а). Вектор напруги мережі U_c знаходиться в протифазі до вектора U_1 . При зменшенні моменту приводного двигуна M_1 зменшується кут навантаження θ . У режимі неробочого ходу при $P_2 = 0$ кут $\theta = 0$ (рис. 14.1,б)



а – режим генератора; б – режим неробочого ходу; в – режим двигуна
Рисунок 13.1 – Робота СМ від мережі в різних режимах

V-подібні характеристики.

Побудова V-подібних характеристик СД виконується для неявнополюсної конструкції машини.

Робота СД у режимі V-подібних характеристик аналізується при незмінній величині активної потужності.

При незмінній напрузі мережі результуюче магнітне поле машини також постійне.

Тому при зміні МРС збудження МРС статора змінюється таким чином, щоб результат їхньої спільної дії залишався незмінним. Ця зміна може відбуватися тільки за рахунок зміни величини та фази струму.

При збільшенні струму збудження від деякого мінімального значення, обумовленого межею статичної стійкості СД, відбувається зменшення струму статора за рахунок зменшення індуктивної складової (активна складова постійна), що робить розмагнічуючу дію на магнітну систему

машини. При деякому значенні струму збудження індуктивна складова струму статора дорівнює нулю. При подальшому збільшенні струму збудження, для сталості магнітного поля, магнітне поле якоря стає розмагнічуючим, тим більшим, чим більше МРС збудження.

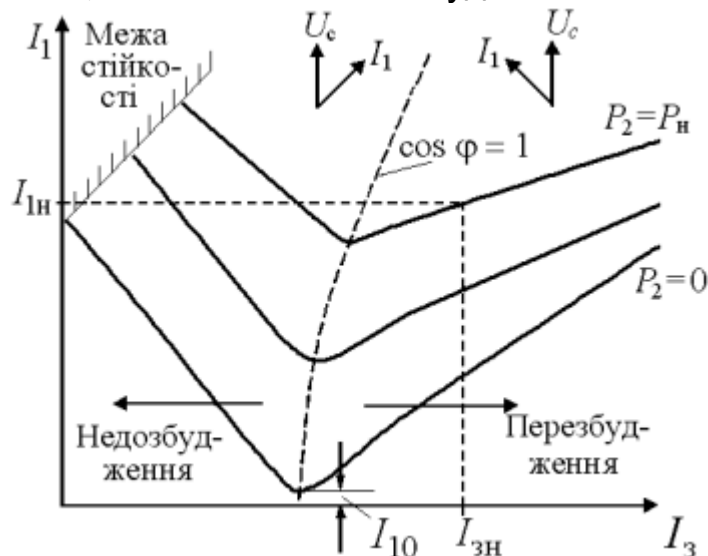


Рисунок 13.2 V-подібні характеристики СД

При перезбудженні СД працює зі струмом, що випереджає напругу мережі та посиляє в мережу реактивну потужність.

СД при перезбудженні є генератором реактивної потужності. При недозбудженні СД працює зі струмом якоря, що відстає від напруги мережі.

Поздовжня реакція якоря в цьому випадку є намагнічуючою. При недозбудженні СД з мережі надходить реактивна потужність.

Недозбуджений синхронний двигун не відрізняється від асинхронного, який споживає реактивну потужність з мережі. Тому синхронні двигуни проектується для роботи при номінальному навантаженні з перезбудженням і $\cos \varphi = 0,9$. Робота з перезбудженням є кращою і з погляду підвищення максимального моменту та перевантажувальної здатності СД.

Синхронний компенсатор.

Як синхронний компенсатор (СК), або фазокомпенсатор (ФК), використовується синхронний двигун, що працює в режимі неробочого ходу з перезбудженням, тобто $E_0 > U_1$

По обмотці статора у цьому випадку протікає практично реактивний струм. Струм фазокомпенсатора $I_{ск}$ випереджає напругу мережі на кут майже 90°

Тобто при роботі в режимі регулювання $\cos \varphi_c$ синхронний компенсатор працює зі змінним струмом збудження $I_3 = \text{var}$.

При роботі СК у режимі стабілізатора напруги струм збудження СК устатковується постійним такої величини, щоб ЕРС компенсатора E_0 дорівнювала номінальній напрузі мережі U_M .

Тобто СК компенсує реактивний струм мережі, зменшуючи падіння напруги в мережі та спричиняючи зростання напруги.

При підвищенні напруги в мережі, тобто при $U_m > U_{mn}$ виникає аналогічний процес створення ΔE . Тільки у цьому випадку струм статора СК $I_{ск}$ відстає від напруги мережі, тобто СК завантажує мережу реактивним струмом, збільшуючи тим самим падіння напруги в мережі й зменшуючи напругу мережі до номінального значення

СК відрізняється за конструкцією від СД:

- оскільки СК працює без навантаження, то немає необхідності мати велику перевантажувальну здатність, тому СК проєктується з мінімальним повітряним зазором;
- зменшення повітряного зазору приводить до зменшення числа витків обмотки збудження, й отже, до зменшення габаритів і здешевлення машини;
- СК не несе навантаження, тому в нього немає необхідності мати вихідний кінець валу.

Способи пуску синхронних двигунів.

Пуск СД шляхом безпосереднього вмикання обмотки статора в мережу неможливий, тому що при збудженому нерухомому роторі полюса обертового магнітного поля статора протягом одного напівперіоду будуть взаємодіяти з полюсами ротора однієї полярності, а протягом іншої половини періоду – з полюсами другої полярності. Відповідно до цього буде змінюватися напрямок обертаючого моменту, а внаслідок механічної інерції ротора цей момент протягом напівперіоду не зможе розігнати ротор до синхронної частоти обертання.

Для пуску СД доводиться застосовувати способи, сутність яких складається в попередньому приведенні ротора в обертання до підсинхронної частоти обертання.

При пуску СД без навантаження можна застосовувати:

– пуск за допомогою приводного двигуна, з яким можна здійснити підмикання СМ до мережі за методом точної або грубої синхронізації, а потім перевести СМ у руховий режим;

– частотний пуск, при якому частота напруги живлення регулюється від нуля до f_1 . При цьому збільшується частота обертання магнітного поля статора й ротор, йдучи за полем, поступово підвищує свою частоту обертання.

Пуск СД під навантаженням здійснюється асинхронним способом пуску. Для реалізації асинхронного пуску в полюсах СД повинна бути закладена пускова обмотка, що являє собою короткозамкнену обмотку типу білячої клітки, стержні якої покладені в пази полюсних наконечників і з'єднані з торців КЗ кільцями або сегментами. Після запуску СД пускова обмотка виконує функції заспокійливої обмотки, обмежуючи хитання ротора.

Схема вмикання СД при асинхронному пуску наведена на рис. 13.3. СД пускається в хід як короткозамкнений АД. Обмотка статора підмикається до мережі. Виникаюче при цьому обертове магнітне поле статора наводить у стержнях пускової обмотки ЕРС, під дією якої у стержнях пускової обмотки протікає струм.

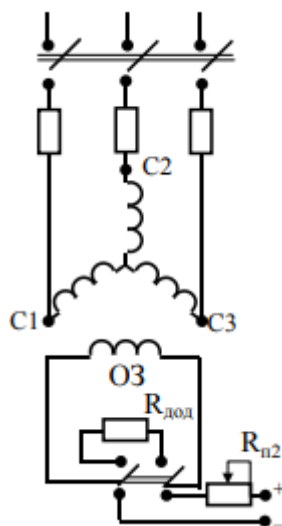


Рисунок 13.3 - Схема вмикання СД при асинхронному пуску

У результаті взаємодії струму пускової обмотки з магнітним полем статора утворюється електромагнітний момент, під дією якого ротор починає обертатися. При частоті обертання, близької до синхронного $n \approx 0,95 n_1$, обмотку збудження підмикають до джерела постійної напруги. При цьому утворюється синхронний момент, що втягує двигун у синхронізм. Чим менше навантаження на валу двигуна, тим легше його входження в синхронізм.

Явнополюсні двигуни малої потужності, що пускають без навантаження на валу, іноді входять у синхронізм лише за рахунок реактивного моменту навіть без вмикання напруги на обмотку збудження. При навантаженні ковзання зростає і двигун важче входить у синхронізм. Найбільший навантажувальний момент, при якому ротор СД ще втягується в синхронізм, називається моментом входу в синхронізм $M_{вх}$.

Залежно від умов роботи й призначення привода потрібні різні величини вхідного й пускового моментів.

У процесі асинхронного пуску СД обмотку збудження не можна залишати розімкнутою, тому що вона має велику кількість витків, і обертовий магнітний потік статора наводить у ній значну ЕРС, небезпечну для ізоляції обмотки. Тому обмотка збудження (ОЗ) замикається на додатковий опір $R_{доп} = (10 \div 12) R_{оз}$.

При асинхронному пуску синхронного двигуна виникають значні пускові струми. Тому асинхронний пуск при повній напрузі застосовується при досить великій потужності мережі, здатній витримати п'яти - семикратні поштовхи пускового струму без помітного спадання напруги. У

протилежному випадку застосовується пуск двигуна при зниженій напрузі – автотрансформаторний або реакторний.

Синхронні двигуни систем автоматики.

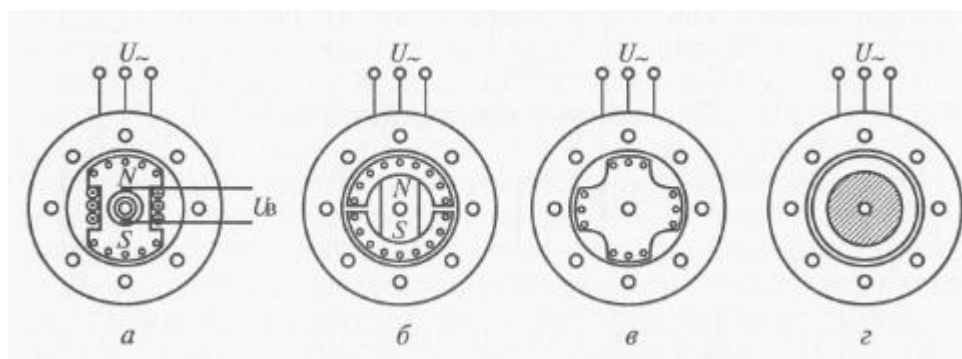
Основною особливістю синхронних мікродвигунів, що визначає області їх застосування, є сталість частоти обертання при незмінній частоті f живильної мережі. Частота обертання ротора двигуна в синхронному режимі не залежить від коливань напруги живлення і моменту опору. Вона дорівнює частоті обертання магнітного поля, тобто синхронної частоті обертання.

В даний час у схемах автоматики синхронні мікродвигуни застосовуються дуже широко. За конструктивним виконанням вони дуже різні, особливо однофазні мікродвигуни малих потужностей (від часток ват до декількох ват).

Двигуни з номінальною потужністю від десятків до сотень ват мають звичайне класичне виконання. Вони складаються з нерухомої частини – статора, в пазах якого розміщується трифазна або двофазна обмотка змінного струму, і ротора, що обертається, який у більшості двигунів має явно виражені полюси.

Залежно від конструкції ротора розрізняють синхронні мікродвигуни з електромагнітним збудженням, постійними магнітами, реактивні і гістерезисні. На рисунку 13.4 представлені основні конструктивні схеми синхронних мікродвигунів.

Мікродвигуни з електромагнітним збудженням (з обмоткою збудження постійного струму на полюсах), внаслідок складності їх конструкцій та пуску, а також необхідності джерела постійного струму, для живлення обмотки збудження в схемах автоматики застосовуються дуже рідко.



а - з електромагнітним збудженням ($2p = 2$); б - з постійними магнітами ($2p = 2$); в - реактивний ($2p = 4$); г - гістерезисний

Рисунок 13.4 – Конструктивні схеми синхронних мікродвигунів

Ротор реактивного синхронного двигуна відрізняється наявністю поздовжніх вирізів на циліндричній поверхні, за допомогою яких формуються явно виражені полюси.

Принцип дії синхронного реактивного двигуна досить простий. Ротор розганяється до підсинхронної швидкості за рахунок асинхронного моменту, а потім втягується в синхронізм за рахунок синхронізуючого моменту, що виникає внаслідок різниці магнітної провідності по поздовжній і поперечній осях.

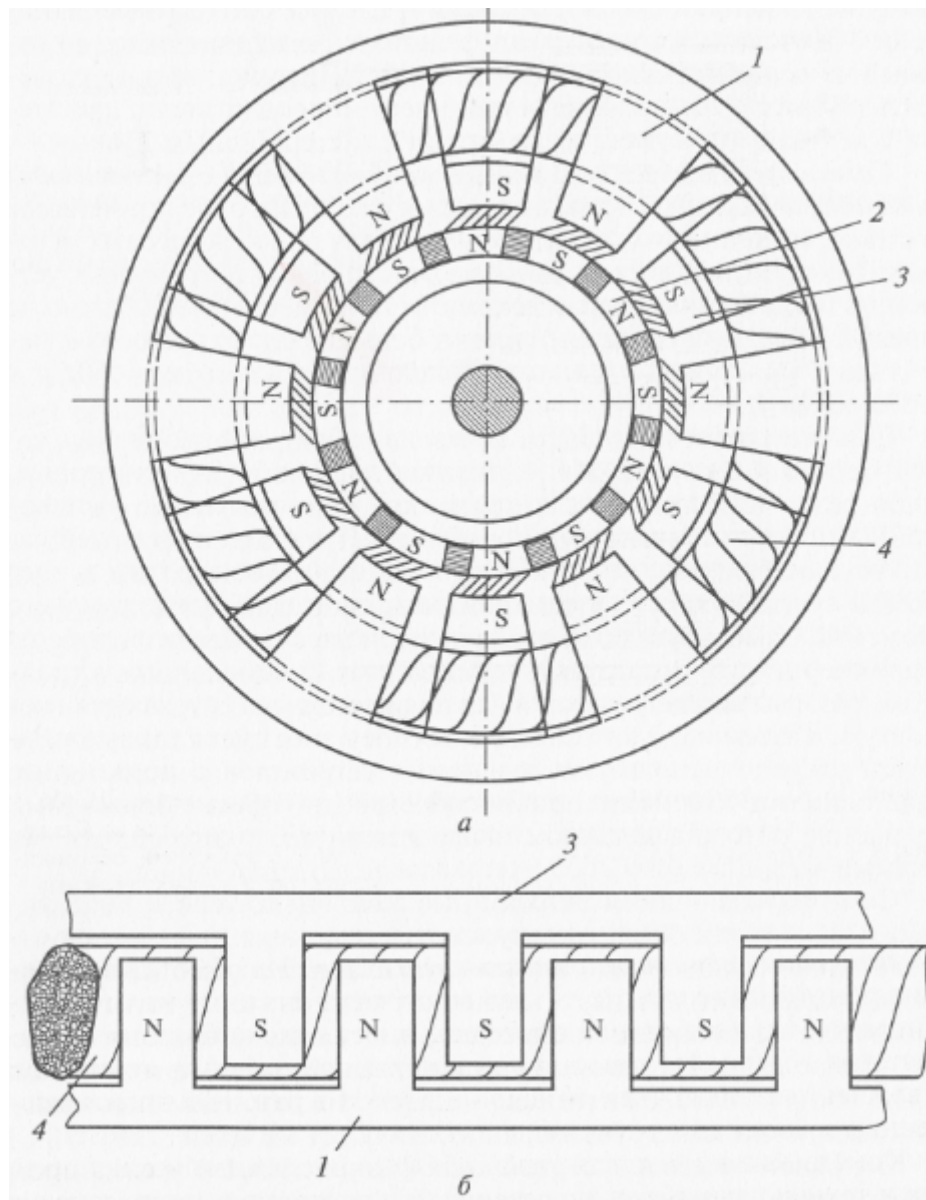
Завдяки простоті конструкції, невисокій вартості, необхідності лише одного джерела живлення, високої надійності, стабільності характеристик синхронні реактивні мікродвигуни, незважаючи на порівняно невисокі енергетичні показники, знаходять широке застосування у всіляких схемах автоматики, фізичних приладах, приладах магнітного запису, зв'язку та ін.

Ротор більшості гістерезисних двигунів являє собою суцільний або шихтований порожній циліндр з магнітотвердого матеріалу, що має широку петлю гістерезису (велику залишкову намагніченість), і розташовується на магнітній або немагнітній втулці.

Виникнення гістерезисного обертового моменту пояснюється наявністю у матеріалі ротора широкої петлі гістерезису. При асинхронній швидкості обертання ротор, перебуваючи в магнітному полі, весь час перемагнічується. При цьому вісь поля ротора, виготовленого з магнітотвердого матеріалу, при наявності моменту опору на валу відстає від осі обертового магнітного поля на деякий кут. У результаті взаємодії поля ротора з випереджаючим його обертовим магнітним полем статора виникає обертаючий гістерезисний момент., за рахунок якого двигун входить до режиму синхронізму.

Але найбільш поширення отримали синхронні двигуни з постійними магнітами. Таки двигуни з самозапуском використовуються для приводу годинникових механізмів, механізмів реле, усілякого роду програмних пристроїв і т. п. Номінальні потужності таких двигунів зазвичай не перевищують частки вата. Вони мають велике число полюсів і невеликі синхронні частоти обертання (зазвичай $\ll 375$ об / хв).

Двигуни часто розраховуються на роботу від однофазних мереж змінного струму. Їх магнітне поле або пульсуюче, або різко виражене еліптичне (у двигунів з розщепленими екранованими полюсами). Пуск цих двигунів часто здійснюється протягом напівперіоду зміни струму за рахунок пульсуючого моменту, який завжди існує в синхронних двигунах. Двигуни з самозапуском розраховуються або на малоінерційне навантаження, або за рахунок спеціального пристрою, що розв'язує ротор і вал на час пуску, пускаються вхолосту, а потім навантажуються. Для забезпечення пуску таких двигунів широко використовують різні пристрої з пружинами, храповиками та іншими пристосуваннями, що забезпечують обертання ротора в заданому напрямку і блокують зворотний хід.



а - загальний вигляд, б - розгортка статора; 1 - передня частина магнітопроводу статора; 2 - ротор; 3 - задня частина магнітопроводу статора; 4 - тороїдальна обмотка

Рисунок 13.5 – Конструктивна схема однофазного синхронного мікродвигуна з самозапуском і постійними магнітами:

Синхронні мікродвигуни з само запуском і постійними магнітами звичайно випускаються плоскими, тобто мають відносно великий діаметр і малу довжину осі. Їх обмотка збудження має вигляд кільця, а магнітний ланцюг статора, виготовлений найчастіше з одного листа сталі, має ключовообразні полюси, розщеплені у двигунів з екранованими полюсами. ККД таких двигунів невеликий - 3...5%. На рисунку 13.5 представлена схематично конструкція одного з таких мікродвигунів.

Синхронні мікродвигуни випускаються як на промислову частоту 50 Гц, так і на підвищені частоти 400, 500, 1000 Гц. Крім звичайних двигунів у схемах автоматики широко застосовуються тихохідні двигуни з електромагнітної редукцією частоти обертання, що працюють на зубцевих

гармоніках поля, і двигуни з хвильовим роторами. Іноді для отримання низьких частот обертання використовуються звичайні двигуни з вбудованими редукторами.

До синхронних мікродвигунів пред'являються як загальні для всіх електричних машин вимоги - високі енергетичні показники (n і $\cos \varphi$), малі габарити, маса і т.п., так і специфічні для синхронних двигунів вимоги, які залежать від схеми, в якій застосовується двигун. В одних схемах від двигуна потрібна сталість середньої частоти обертання, в інших - сталість миттєвої частоти обертання в межах одного обороту ротора і т. п.

Крім синхронних мікродвигунів безперервного обертання знайшли застосування імпульсні крокові двигуни.

Висновки.

1. Синхронний двигун працює зі сталою частотою обертання, яка визначається частотою живильної мережі та числом пар полюсів.
2. Робота синхронної машини можлива як у режимі двигуна, так і в режимі генератора, що визначається знаком та величиною кута навантаження.
3. V-подібні характеристики є важливим інструментом аналізу режимів роботи СД і демонструють вплив струму збудження на струм статора та $\cos \varphi$.
4. Перезбуджений синхронний двигун є джерелом реактивної потужності, тоді як недозбуджений — її споживачем.
5. Синхронний компенсатор дозволяє ефективно регулювати реактивну потужність і напругу в електричних мережах без механічного навантаження.
6. Пуск синхронних двигунів потребує спеціальних методів, оскільки безпосередній пуск від мережі неможливий.
7. Асинхронний пуск із пусковою обмоткою є найбільш поширеним для двигунів середньої та великої потужності.
8. Синхронні мікродвигуни широко застосовуються в автоматичі завдяки стабільності частоти обертання та простоті керування.
9. Двигуни з постійними магнітами та реактивні синхронні двигуни вирізняються простотою конструкції та високою надійністю.
10. Синхронні двигуни відіграють важливу роль у підвищенні енергоефективності та покращенні режимів роботи електричних мереж.

Контрольні питання.

1. У чому полягає принцип дії синхронного двигуна?
2. Що таке синхронна частота обертання і від чого вона залежить?
3. Які режими роботи характерні для синхронної машини?
4. Поясніть фізичний зміст кута навантаження синхронного двигуна.
5. Що відображають V-подібні характеристики синхронного двигуна?
6. Як змінюється характер струму статора при перезбудженні та недозбудженні СД?

7. Чому синхронний двигун при перезбудженні є джерелом реактивної потужності?
8. Призначення та принцип роботи синхронного компенсатора.
9. Чому безпосередній пуск синхронного двигуна від мережі неможливий?
10. У чому полягає асинхронний спосіб пуску синхронного двигуна?
11. Яке призначення пускової (заспокійливої) обмотки?
12. Що таке момент входу в синхронізм?
13. Які типи синхронних мікродвигунів застосовуються в автоматичі?
14. У чому особливість реактивних синхронних двигунів?
15. Поясніть принцип дії гістерезисного синхронного двигуна.

Використана література.

1. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
2. Гайденок Ю. А. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
3. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
4. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 331с.

ТЕМА 14. КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Основні та додаткові функції систем автоматичного керування електроприводами. Електричні схеми СУЕП і вимоги, що пред'являються до них. Класифікація електричних схем. Передавальні функції та структурні схеми. Форми математичного опису лінеаризованих систем автоматичного керування електроприводами.

Основні та додаткові функції систем автоматичного керування електроприводами

Система автоматичного керування електроприводом (САК електропривода) є функціонально завершеним комплексом технічних засобів і алгоритмів, призначених для керування електромеханічним перетворенням енергії з метою забезпечення заданих режимів роботи виконавчого механізму. Функції САК формуються відповідно до призначення електропривода, умов експлуатації, вимог безпеки та рівня автоматизації технологічного процесу.

У навчальній і інженерній практиці функції систем автоматичного керування електроприводами доцільно поділяти на основні та додаткові, що дозволяє чітко розмежувати обов'язкові функції працездатності та функції підвищення ефективності, надійності й безпеки.

Основні функції систем автоматичного керування електроприводами

Основні функції є необхідною умовою існування електропривода як керованої системи. Без реалізації цих функцій електропривод не може виконувати задані технологічні завдання або працює некеровано.

Функція пуску електропривода

Функція пуску забезпечує перехід електропривода зі стану спокою в робочий режим. У системах автоматичного керування пуск реалізується з урахуванням електричних, механічних та теплових обмежень.

Основними завданнями функції пуску є:

- обмеження пускового струму;
- зменшення пускових механічних навантажень;
- забезпечення стабільного розгону виконавчого механізму.

У простих системах пуск здійснюється шляхом безпосереднього підключення двигуна до мережі. У більш складних САК застосовуються керовані перетворювачі, що дозволяють реалізувати плавний або програмний пуск.

Функція регулювання керованої величини

Центральною функцією САК електропривода є регулювання основної координати руху, якою найчастіше виступає:

- кутова швидкість обертання;
- момент;

- положення виконавчого органа.

Регулювання здійснюється шляхом автоматичної зміни керуючого впливу на електродвигун з урахуванням:

- заданого значення (уставки);
- фактичного значення керованої величини;
- сигналу похибки регулювання.

Для цього в структурі системи застосовуються зворотні зв'язки, які забезпечують стабільність та точність підтримання заданого режиму.

Функція підтримання сталого режиму роботи

У процесі експлуатації електропривод зазнає впливу зовнішніх збурень, зокрема:

- зміни навантаження;
- коливань напруги живлення;
- зміни параметрів механізму.

САК забезпечує компенсацію дії цих збурень та підтримання заданого режиму роботи. Це досягається за рахунок автоматичного коригування керуючих сигналів без участі оператора.

Функція гальмування та зупинки

Функція гальмування призначена для контрольованого зменшення швидкості та зупинки електропривода. У системах автоматичного керування вона реалізується з урахуванням вимог:

- безпеки;
- точності зупинки;
- зменшення зносу механічних вузлів.

Гальмування може бути електричним, електромеханічним або комбінованим. САК забезпечує вибір режиму гальмування залежно від умов роботи та типу виконавчого механізму.

Додаткові функції систем автоматичного керування електроприводами

Додаткові функції не є обов'язковими для базової працездатності електропривода, однак істотно підвищують ефективність, надійність та адаптивність системи.

Захисні функції

Захист електропривода є однією з найважливіших додаткових функцій САК. Він спрямований на запобігання аварійним режимам та пошкодженню обладнання.

Основні захисні функції включають:

- захист від перевантаження;
- захист від короткого замикання;
- захист від перегріву двигуна;
- захист від обриву фаз або асиметрії напруг.

У сучасних системах захисні функції інтегруються безпосередньо в керувальні пристрої та працюють в автоматичному режимі.

Функція сигналізації та індикації

САК електропривода забезпечує інформування обслуговуючого персоналу про:

- режими роботи електропривода;
- наявність аварійних або передаварійних станів;
- параметри електричних і механічних величин.

Сигналізація може бути світловою, звуковою або цифровою, а індикація — у вигляді аналогових чи цифрових показів.

Функція автоматичного блокування

Функція блокування запобігає неправильним або небезпечним діям оператора чи автоматичних пристроїв. Вона забезпечує:

- заборону пуску при наявності аварійних сигналів;
- логічну послідовність виконання операцій;
- взаємне блокування кількох електроприводів у складі одного механізму.

Такі функції особливо важливі в складних технологічних установках із кількома виконавчими механізмами.

Функція діагностики та контролю стану

Сучасні САК електроприводів дедалі частіше виконують функції самодіагностики, які дозволяють:

- виявляти несправності на ранній стадії;
- аналізувати відхилення параметрів від норми;
- формувати повідомлення про необхідність технічного обслуговування.

Це підвищує експлуатаційну надійність та знижує витрати на ремонт.

Функції енергозбереження та оптимізації режимів

До додаткових функцій належать також алгоритми, спрямовані на:

- зменшення споживання електричної енергії;
- оптимізацію пускових і робочих режимів;
- узгодження роботи електропривода з реальними потребами технологічного процесу.

Такі функції особливо актуальні для тривалих та циклічних режимів роботи.

Електричні схеми СУЕП і вимоги, що пред'являються до них.

Електричні схеми систем управління електроприводами (СУЕП) є основою реалізації автоматизованого керування електромеханічними установками. Саме через електричні схеми забезпечується взаємодія між джерелом живлення, електродвигуном, апаратурою керування, захисту,

сигналізації та елементами зворотного зв'язку. Для фахового молодшого бакалавра розуміння призначення, структури та вимог до електричних схем СУЕП є ключовою складовою професійної підготовки.

Призначення електричних схем СУЕП

Електрична схема СУЕП відображає сукупність електричних з'єднань та елементів, за допомогою яких реалізуються функції керування електроприводом. Вона є інженерним документом, що використовується на всіх етапах життєвого циклу електропривода — від проектування до експлуатації та ремонту.

Основне призначення електричних схем СУЕП полягає у:

- забезпеченні пуску, зупинки та реверсу електродвигуна;
- реалізації алгоритмів автоматичного керування;
- захисті електропривода та електрообладнання;
- контролі та індикації режимів роботи;
- забезпеченні взаємодії електропривода з іншими елементами технологічної системи.

Для здобувачів освіти важливо розуміти, що схема не є абстрактним зображенням, а практичним інструментом, за яким виконується монтаж, налагодження та обслуговування електропривода.

Загальна структура електричних схем СУЕП

Типова електрична схема СУЕП складається з кількох функціонально завершених частин, кожна з яких виконує власне завдання.

Силова частина

Силова частина схеми призначена для передачі електричної енергії від джерела живлення до електродвигуна. До її складу входять:

- джерело живлення;
- комутаційні апарати;
- захисні елементи;
- електродвигун.

Силова частина розраховується на робочі струми та напруги електропривода і повинна забезпечувати надійну та безпечну передачу енергії в усіх режимах роботи.

Керувальна частина

Керувальна частина забезпечує формування команд керування електроприводом. Вона включає:

- кнопокві пости та перемикачі;
- реле, контактори, логічні елементи;
- електронні або мікропроцесорні пристрої керування.

Саме в керувальній частині реалізуються алгоритми автоматичного керування, блокування та послідовність виконання операцій.

Система зворотного зв'язку

У сучасних СУЕП важливе місце займають елементи зворотного зв'язку, які забезпечують контроль параметрів роботи електропривода. До них належать:

- датчики швидкості;
- датчики струму та напруги;
- кінцеві вимикачі та датчики положення.

Зворотний зв'язок дозволяє системі автоматично коригувати режим роботи та підвищує точність і стабільність керування.

Основні вимоги до електричних схем СУЕП

Електричні схеми СУЕП повинні відповідати низці технічних, експлуатаційних та нормативних вимог. Для рівня фахового молодшого бакалавра ці вимоги розглядаються на прикладному та інженерному рівні.

Функціональна відповідність

Схема повинна забезпечувати виконання всіх заданих функцій електропривода, зокрема:

- пуск і зупинку;
- зміну напрямку обертання (за потреби);
- підтримання заданих режимів роботи;
- аварійне відключення.

Будь-яка схема розробляється виходячи з конкретного технологічного завдання, тому надлишкові або не задіяні елементи вважаються недоцільними.

Надійність і безвідмовність

Електрична схема СУЕП повинна забезпечувати стабільну роботу електропривода протягом усього терміну експлуатації. Це досягається за рахунок:

- використання стандартних і перевірених елементів;
- мінімізації кількості контактів і з'єднань;
- чіткої логіки керування.

Особлива увага приділяється елементам, що працюють у складних умовах — при підвищених температурах, вібраціях або запиленості.

Безпека експлуатації

Однією з найважливіших вимог є електрична та функціональна безпека. Схеми СУЕП повинні:

- запобігати ураженню електричним струмом;
- виключати можливість неконтрольованого пуску;
- забезпечувати аварійне відключення.

З цією метою в схемах застосовуються захисні блокування, аварійні кнопки зупинки та логічні обмеження.

Зручність обслуговування та ремонту

Електрична схема має бути зрозумілою для читання та аналізу. Це особливо важливо для експлуатаційного персоналу.

До цієї групи вимог належать:

- чітке маркування елементів;
- логічне групування функціональних ланцюгів;
- наявність принципів і монтажних схем.

Добре спроектована схема спрощує пошук несправностей і скорочує час простою обладнання.

Відповідність умовам експлуатації

СУЕП повинні працювати в конкретних умовах виробництва, що накладає додаткові вимоги на схеми:

- стійкість до перепадів напруги;
- захист від впливу пилу, вологи та агресивних середовищ;
- сумісність із суміжним обладнанням.

Схема повинна враховувати реальні умови експлуатації, а не лише номінальні режими.

Класифікація електричних схем.

Класифікація електричних схем є необхідним елементом підготовки фахівця в галузі електроприводів, оскільки дозволяє систематизувати різноманіття схемних рішень, що застосовуються на практиці, та правильно обирати і використовувати відповідний тип схеми на етапах проєктування, монтажу, налагодження й експлуатації. Для рівня фахового молодшого бакалавра класифікація схем розглядається з позицій практичного призначення, способу подання інформації та функціональної ролі в системі управління електроприводом.

Класифікація електричних схем за призначенням

Найбільш поширеним і практично значущим є поділ електричних схем за їх призначенням у життєвому циклі електропривода.

Принципові електричні схеми

Принципова електрична схема відображає склад елементів і логіку їх електричного з'єднання, необхідну для реалізації заданих функцій системи управління електроприводом рис. 14.1.

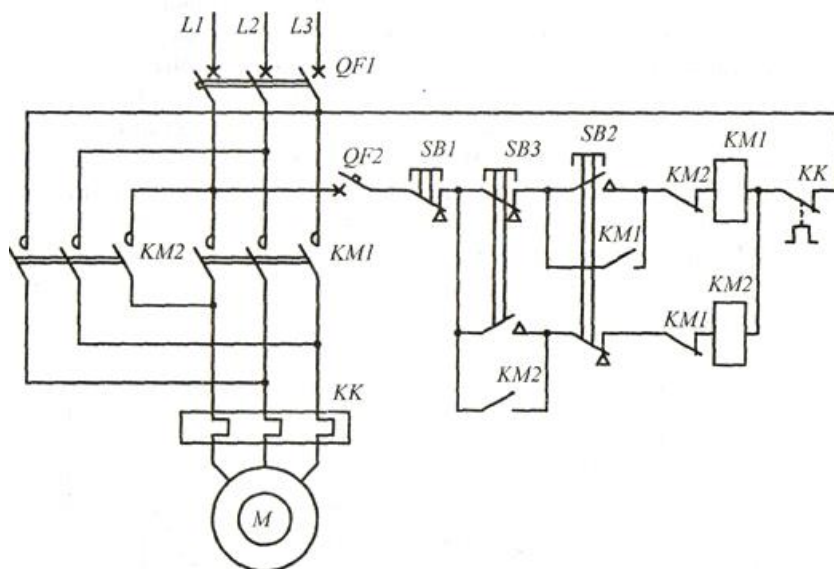


Рисунок 14.1 – Принципова електрична схема системи управління електроприводом

На принципових схемах показують:

- електричні апарати, прилади та пристрої;
- електричні зв'язки між ними;
- умовні позначення елементів згідно зі стандартами.

Такі схеми використовуються:

- при проектуванні системи;
- для аналізу алгоритмів керування;
- під час пошуку несправностей.

Принципова схема не відображає фізичне розташування елементів, а лише їх функціональний та електричний зв'язок.

Монтажні схеми

Монтажна схема призначена для практичної реалізації електричних з'єднань під час складання електропривода.

Вона містить інформацію про:

- фізичне розташування апаратів;
- прокладання проводів і кабелів;
- клемні з'єднання;
- маркування жил і затискачів.

Монтажні схеми широко застосовуються:

- під час виготовлення шаф керування;
- при монтажі на об'єкті;
- у процесі ремонту та модернізації.

Для фахового молодшого бакалавра вміння читати монтажні схеми є критично важливим, оскільки саме вони використовуються безпосередньо в практичній діяльності.

Схеми підключення

Схеми підключення показують зовнішні електричні зв'язки між елементами електропривода та суміжним обладнанням.

Вони застосовуються для:

- підключення електродвигунів;
- приєднання датчиків і виконавчих пристроїв;
- інтеграції електропривода в загальну систему автоматизації.

Такі схеми мають прикладний характер і забезпечують правильне та безпечне підключення обладнання.

Класифікація електричних схем за функціональною ознакою

Залежно від того, які функції реалізує схема, електричні схеми поділяються на кілька груп.

Силові схеми

Силові схеми призначені для передачі електричної енергії від джерела живлення до електродвигуна.

Вони включають:

- комутаційні апарати;
- захисні пристрої;
- електродвигун.

Силові схеми розраховуються на значні струми та напруги й повинні відповідати вимогам електробезпеки та теплової стійкості.

Схеми керування

Схеми керування реалізують логіку роботи електропривода, зокрема:

- пуск і зупинку;
- реверс;
- блокування;
- автоматичні режими.

У цих схемах використовуються реле, контактори, логічні та електронні елементи. Вони працюють, як правило, на знижених напругах, що підвищує безпеку обслуговування.

Схеми сигналізації та захисту

До цієї групи належать схеми, що забезпечують:

- контроль стану електропривода;
- індикацію режимів роботи;
- захист від аварійних ситуацій.

Такі схеми тісно пов'язані зі схемами керування і доповнюють їх, підвищуючи надійність та безпеку системи.

Класифікація електричних схем за способом подання інформації

За способом відображення інформації електричні схеми поділяються на кілька типів, кожен з яких має власне дидактичне та практичне значення.

Функціональні схеми

Функціональна схема показує основні функціональні блоки системи та зв'язки між ними без деталізації елементної бази.

Вона дозволяє:

- зрозуміти загальний принцип роботи електропривода;
- проаналізувати взаємодію підсистем;
- використовувати схему на етапі навчання та попереднього проектування.

Структурні схеми

Структурні схеми відображають ієрархічну побудову системи управління електроприводом та взаємозв'язки між її складовими.

Вони застосовуються для:

- аналізу систем автоматичного керування;
- пояснення принципів зворотного зв'язку;
- переходу до математичного опису системи.

Для фахового молодшого бакалавра структурні схеми є важливим інструментом формування інженерного мислення.

Передавальні функції та структурні схеми.

Структурні схеми систем автоматичного керування електроприводами

Поняття та призначення структурної схеми

Структурна схема — це графічне подання системи автоматичного керування у вигляді функціональних блоків, з'єднаних між собою лініями, що відображають передавання сигналів. Кожен блок відповідає окремій частині системи (регулятору, перетворювачу, двигуну, механічному навантаженню тощо) та характеризується певними динамічними властивостями.

Основне призначення структурної схеми полягає у:

- наочному відображенні складу САК електропривода;
- поясненні взаємодії між елементами системи;
- аналізі впливу окремих ланок на загальну поведінку електропривода;
- підготовці до подальшого математичного опису.

На відміну від електричних принципів схем, структурні схеми не відображають конкретні апарати або з'єднання, а показують логіку керування та рух інформаційних сигналів.

Основні елементи структурної схеми електропривода

Типова структурна схема системи автоматичного керування електроприводом включає такі основні елементи:

- Задатчик — формує сигнал завдання (швидкості, моменту або положення).

- Порівнювальний елемент — визначає різницю між заданим і фактичним значенням керованої величини.
- Регулятор — формує керуючий сигнал на основі похибки.
- Силовий перетворювач — перетворює електричну енергію відповідно до сигналу керування.
- Електродвигун — перетворює електричну енергію в механічну.
- Механічне навантаження — робочий механізм, на який передається рух.
- Зворотний зв'язок — забезпечує інформацію про фактичний стан системи.

Така структура є типовою для більшості сучасних електроприводів і може ускладнюватися залежно від вимог до точності та динаміки.

Розімкнені та замкнені структурні схеми

За наявності зворотного зв'язку структурні схеми поділяються на:

- Розімкнені системи, у яких керування здійснюється без урахування фактичного результату.
- Замкнені системи, у яких сигнал зворотного зв'язку дозволяє коригувати роботу електропривода.

Замкнені системи є домінуючими в промислових електроприводах, оскільки забезпечують:

- стабільність режимів роботи;
- компенсацію зовнішніх збурень;
- підвищену точність регулювання.

Передавальні функції в системах автоматичного керування електроприводами

Сутність поняття передавальної функції

Передавальна функція є узагальненою математичною характеристикою динамічної ланки, яка показує, як змінюється вихідна величина залежно від вхідної. У загальному вигляді передавальна функція визначається як відношення вихідного сигналу до вхідного за умови нульових початкових умов.

Для фахового молодшого бакалавра передавальна функція розглядається не як об'єкт строгого математичного аналізу, а як засіб порівняння та оцінки динамічних властивостей елементів системи.

Передавальні функції основних ланок електропривода

У структурній схемі кожному функціональному блоку відповідає своя передавальна функція. Найчастіше розглядають:

- передавальну функцію регулятора;
- передавальну функцію силового перетворювача;
- передавальну функцію електродвигуна;
- передавальну функцію механічної частини.

Кожна з цих ланок має власні інерційні властивості, що впливають на швидкодію та стабільність системи в цілому.

Узагальнена передавальна функція системи

Для замкнених систем автоматичного керування вводиться поняття загальної (еквівалентної) передавальної функції, яка описує поведінку всієї системи від входу до виходу.

Практичне значення цього поняття полягає в тому, що воно дозволяє:

- оцінити реакцію електропривода на зміну завдання;
- аналізувати вплив зворотного зв'язку;
- порівнювати різні варіанти систем керування.

На рівні фахового молодшого бакалавра достатньо розуміти, що зміна будь-якої ланки структурної схеми призводить до зміни передавальних властивостей усієї системи.

Взаємозв'язок структурних схем і передавальних функцій

Структурні схеми та передавальні функції є взаємодоповнювальними інструментами опису САК електропривода. Структурна схема відповідає на питання *«з яких частин складається система і як вони з'єднані»*, а передавальна функція — *«як система поводить себе в часі при зміні сигналів»*.

Форми математичного опису лінеаризованих систем автоматичного керування електроприводами.

Системи автоматичного керування електроприводами (САК ЕП) у реальних умовах є, як правило, нелінійними, оскільки містять елементи з нелінійними характеристиками: електродвигуни, силові напівпровідникові перетворювачі, механічні передачі, насичення магнітних кіл, сухе тертя тощо. Проте для аналізу, пояснення принципів роботи та інженерної оцінки динамічних властивостей у навчальній практиці широко застосовується лінеаризований опис системи.

Для рівня фахового молодшого бакалавра математичний опис лінеаризованих САК електроприводів розглядається як інструмент формалізованого подання поведінки системи, без глибокого аналітичного дослідження.

Сутність лінеаризації систем автоматичного керування електроприводами

Поняття лінеаризації

Лінеаризація — це процедура наближеного опису нелінійної системи лінійною математичною моделлю в околі певного робочого режиму. Такий підхід базується на припущенні, що відхилення змінних величин від номінальних значень є малими.

У практичному сенсі лінеаризація дозволяє:

- спростити аналіз динамічних процесів;
- застосовувати стандартні методи теорії автоматичного керування;
- уніфікувати опис різних типів електроприводів.

Важливо підкреслити, що лінеаризована модель є справедливою лише в обмеженому діапазоні режимів, що відповідають нормальній роботі електропривода.

Диференціальні рівняння як форма математичного опису

Загальна характеристика диференціального опису

Однією з основних форм математичного опису лінеаризованих САК електроприводів є система лінійних диференціальних рівнянь, яка пов'язує вхідні, вихідні та внутрішні змінні системи.

У такому описі:

- електричні процеси характеризуються рівняннями напруг і струмів;
- механічні процеси — рівняннями руху;
- взаємозв'язок між ними задається коефіцієнтами, що вважаються сталими.

Для навчального рівня достатньо розуміти, що диференціальні рівняння:

- описують зміну величин у часі;
- відображають інерційні властивості системи;
- є вихідною формою для отримання інших описів.

Обмеження диференціального опису

Хоча диференціальні рівняння є фундаментальною формою опису, для практичного використання вони мають певні обмеження:

- складність безпосереднього аналізу;
- низька наочність;
- обмежене застосування в експлуатаційній документації.

Саме тому на практиці часто використовують інші, більш зручні форми подання.

Передавальні функції як форма математичного опису

Передавальна функція лінеаризованої системи

Передавальна функція є формою математичного опису, що пов'язує вхідний і вихідний сигнали системи у символічній формі. Вона дозволяє описати динамічні властивості електропривода без явного розв'язування диференціальних рівнянь.

У лінеаризованих системах передавальна функція:

- має раціональний вигляд;
- визначається параметрами електричної та механічної частин;
- зручна для аналізу впливу окремих ланок.

Практичне значення передавальних функцій:

- вони тісно пов'язані зі структурними схемами;

- дозволяють порівнювати різні системи керування;
- використовуються в технічній документації та навчальних матеріалах.

Передавальна функція є містком між фізичною системою та її структурним поданням.

Структурні схеми як форма узагальненого опису

Структурно-математичне подання системи

Структурна схема поєднує графічну та математичну форми опису, оскільки кожному блоку відповідає певна передавальна функція або математична залежність.

У лінеаризованих САК електроприводів структурна схема:

- відображає послідовність обробки сигналів;
- дозволяє виділити окремі динамічні ланки;
- спрощує аналіз взаємодії елементів.

Переваги структурного опису

Основними перевагами структурних схем є:

- наочність;
- логічність;
- зручність для пояснення принципів роботи.

Інші форми математичного опису (оглядово)

Окрім основних форм, у технічній літературі застосовуються й інші способи опису лінеаризованих систем:

- алгебраїчні співвідношення;
- операторні форми;
- графічні залежності перехідних процесів.

Висновки.

1. Системи автоматичного керування електроприводами є невід'ємною складовою сучасних електромеханічних установок і забезпечують керованість, стабільність, безпеку та ефективність їх роботи.
2. Функції САК електроприводів поділяються на основні, що забезпечують працездатність і керування рухом, та додаткові, які підвищують надійність, безпеку, інформативність і енергоефективність системи.
3. Електричні схеми СУЕП є інженерною основою реалізації алгоритмів керування та повинні відповідати вимогам функціональності, надійності, безпеки й зручності експлуатації.
4. Класифікація електричних схем за призначенням, функціональною роллю та способом подання інформації дозволяє правильно обирати та застосовувати схеми на різних етапах проєктування, монтажу й обслуговування електроприводів.

5. Структурні схеми дають узагальнене уявлення про побудову системи автоматичного керування та взаємодію її складових, відокремлюючи логіку керування від конкретної елементної бази.
6. Передавальні функції є формалізованим засобом опису динамічних властивостей лінеаризованих систем автоматичного керування електроприводами та дозволяють оцінювати вплив окремих ланок на поведінку системи в цілому.
7. Лінеаризовані математичні моделі застосовуються для аналізу та пояснення роботи електроприводів у межах нормальних режимів і є важливим навчальним інструментом для формування інженерного мислення.
8. Засвоєння матеріалу теми створює основу для подальшого вивчення регуляторів, динамічних режимів і методів аналізу систем автоматичного керування електроприводами.

Контрольні питання.

1. Яке призначення систем автоматичного керування електроприводами?
2. Які функції відносять до основних функцій САК електроприводів?
3. Яке призначення додаткових функцій систем автоматичного керування електроприводами?
4. Яку роль відіграють електричні схеми в системах управління електроприводами?
5. З яких основних частин складається електрична схема СУЕП?
6. Які основні вимоги висуваються до електричних схем систем управління електроприводами?
7. За якими ознаками класифікують електричні схеми електроприводів?
8. Чим принципова електрична схема відрізняється від монтажною?
9. Яке призначення силових і керувальних схем?
10. Що таке структурна схема системи автоматичного керування електроприводом?
11. Які основні елементи входять до структурної схеми електропривода?
12. Чим відрізняються розімкнені та замкнені системи керування?
13. Що називають передавальною функцією ланки або системи?
14. Яке практичне значення мають передавальні функції в аналізі САК електроприводів?
15. Чому для аналізу систем автоматичного керування застосовують лінеаризовані математичні моделі?
16. Які основні форми математичного опису лінеаризованих САК електроприводів використовуються в навчальному процесі?

Використана література.

1. Васи́лега П. О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 290 с.

2. Вахоніна Л.В., Циганов О.М., Мардзявко В.А., Руденко А.Ю. Електричні машини та апарати : конспект лекцій. Миколаїв : Миколаївський національний аграрний університет, 2023. 367 с.
3. Електропривод виробничих машин і механізмів : навчальний посібник / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко, В. Я. Бунько, В. Ю. Рамш; за ред. О.Ю. Синявського. Київ : ФОП Ямчинський О.В., 2020. 444 с.

ТЕМА 15. КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНОЇ АПАРАТУРИ

Вузли пуску та гальмування електродвигунів, що працюють за принципом часу. Вузли пуску та гальмування двигунів, що працюють за принципом швидкості. Вузли пуску та гальмування електродвигунів, що працюють за принципом струму. Вузли пуску та гальмування електродвигунів за принципом шляху.

Вузли пуску та гальмування електродвигунів, що працюють за принципом часу.

Загальна характеристика принципу керування за часом

Керування електроприводами за принципом часу є одним із найбільш поширених рішень у схемах релейно-контакторного керування. У таких системах момент вмикання або вимикання окремих елементів схеми визначається заданою часовою затримкою, незалежно від фактичних механічних або електричних параметрів електродвигуна.

Основним елементом реалізації цього принципу є реле часу, яке забезпечує:

- затримку ввімкнення контактора;
- затримку вимкнення контактора;
- формування послідовності пускових або гальмівних операцій.

Часові принципи широко застосовуються в електроприводах:

- насосних і вентиляційних установок;
- конвеєрних механізмів;
- верстатного обладнання;
- допоміжних механізмів промислових агрегатів.

Пуск електродвигуна з часовою затримкою

Найпростішим прикладом є пуск асинхронного електродвигуна з витримкою часу між подачею напруги керування та вмиканням силового контактора.

У типовій схемі:

- натискання кнопки «Пуск» збуджує котушку реле часу;
- після закінчення встановленої витримки часу замикаються його контакти;
- вмикається головний контактор двигуна.

Такий підхід дозволяє:

- уникнути одночасного пуску декількох потужних електродвигунів;
- зменшити пускові струмові навантаження на мережу;
- забезпечити послідовність запуску механізмів у технологічній лінії.

Пуск за схемою «зірка – трикутник» з реле часу

Одним із класичних прикладів застосування принципу часу є пуск асинхронного двигуна за схемою «зірка – трикутник».

Основні етапи роботи:

1. Після натискання кнопки «Пуск» двигун підключається за схемою «зірка».
2. Одночасно вмикається реле часу.
3. Після завершення заданої витримки часу реле:
 - вимикає контактор «зірки»;
 - вмикає контактор «трикутника».
4. Двигун переходить у номінальний режим роботи.

Переваги такого пуску:

- зменшення пускового струму у 2,5–3 рази;
- зниження динамічних навантажень на механізм;
- підвищення ресурсу електродвигуна та контактної апаратури.

Недоліком є відсутність зворотного зв'язку, оскільки перемикання відбувається лише за часом, без урахування реальної швидкості обертання ротора.

Гальмування електродвигунів в функції часу.

Принцип часу застосовується не лише для пуску, але й для гальмування електродвигунів. Найпоширенішими є:

- гальмування противмиканням;
- динамічне гальмування постійним струмом.

У схемах з противмиканням:

- після подачі команди «Стоп» реле часу забезпечує короточасну подачу напруги з реверсуванням фаз;
- через заданий час гальмівний контактор вимикається, запобігаючи реверсу обертання.

У схемах динамічного гальмування:

- після вимкнення мережі змінного струму реле часу вмикає ланцюг подачі постійного струму в обмотки статора;
- по закінченню часу гальмування ланцюг розмикається.

Оцінка принципу керування за часом

Переваги:

- простота схемної реалізації;
- надійність релейно-контакторних вузлів;
- низька вартість апаратури;
- зручність налагодження.

Недоліки:

- відсутність урахування реального стану двигуна;
- залежність ефективності від правильного вибору витримки часу;
- зниження точності при змінних навантаженнях.

Вузли пуску та гальмування двигунів, що працюють за принципом швидкості.

Загальна характеристика принципу керування за швидкістю

Керування електроприводами за принципом швидкості ґрунтується на використанні зворотного зв'язку за частотою обертання вала електро-двигуна. На відміну від часових схем, у таких системах перемикання режимів пуску або гальмування відбувається при досягненні заданої швидкості, а не через фіксований проміжок часу.

Основними елементами реалізації цього принципу є:

- реле швидкості;
- тахогенератори;
- відцентрові вимикачі;
- електромеханічні та електричні датчики швидкості.

Принцип швидкості широко застосовується у приводах, де:

- навантаження змінюється в широких межах;
- необхідно забезпечити плавний пуск і гальмування;
- важлива стабільність режимів роботи механізму.

Вузли пуску електродвигунів за принципом швидкості

У вузлах пуску за швидкістю перемикання між режимами відбувається після досягнення валом двигуна певної частоти обертання. Найпоширенішим прикладом є пуск асинхронного двигуна з поетапним виведенням пускових опорів.

Принцип дії:

1. При пуску електродвигуна в коло ротора або статора вводяться пускові резистори.
2. У міру зростання швидкості обертання реле швидкості або тахогенератор формує керуючий сигнал.
3. При досягненні встановленої швидкості відповідний контактор вимикає частину опорів.
4. Процес повторюється до повного виведення пускових елементів.

Такий алгоритм забезпечує:

- зниження пускового струму;
- зменшення механічних ударів;
- підвищення надійності електропривода.

Використання тахогенераторів у схемах керування

Тахогенератор — це електромеханічний пристрій, який перетворює швидкість обертання вала у пропорційну електричну напругу. У релейно-контакторних схемах тахогенератор застосовується як датчик швидкості.

Схема роботи:

- тахогенератор механічно з'єднується з валом електродвигуна;
- напруга з тахогенератора подається на реле швидкості;
- при досягненні заданого порога реле спрацьовує та перемикає контактори.

Перевагами такого рішення є:

- висока точність спрацювання;
- незалежність від зміни навантаження;
- можливість регулювання порогів швидкості.

Вузли гальмування електродвигунів за принципом швидкості

Гальмування за швидкістю застосовується у випадках, коли необхідно припинити гальмівний вплив при досягненні малої або нульової швидкості, щоб уникнути реверсу або повторного розгону двигуна.

Найпоширенішими є:

- гальмування противмиканням із контролем швидкості;
- динамічне гальмування з автоматичним вимкненням.

У таких схемах:

- після подачі команди «Стоп» вмикається гальмівний режим;
- датчик швидкості контролює зменшення обертів;
- при досягненні заданої швидкості гальмівний контактор вимикається.

Це дозволяє:

- запобігти зворотному обертанню вала;
- зменшити зношування механічних елементів;
- підвищити безпеку роботи електропривода.

Відцентрові вимикачі як елементи керування

У простих електроприводах, зокрема у двигунах малої та середньої потужності, застосовуються відцентрові вимикачі, які спрацьовують під дією відцентрових сил.

Принцип роботи:

- при низькій швидкості контакти вимикача замкнені;
- зі зростанням швидкості під дією відцентрових сил контакти розмикаються;
- відбувається автоматичне перемикавання режиму пуску.

Такі пристрої відрізняються:

- конструктивною простотою;
- автономністю;
- відсутністю потреби в електроживленні кола керування.

Переваги та недоліки керування за швидкістю

Переваги:

- наявність зворотного зв'язку;
- стабільність режимів пуску та гальмування;
- адаптація до змін навантаження.

Недоліки:

- складніша схемна реалізація;
- потреба у додаткових датчиках;
- підвищені вимоги до налаштування та обслуговування.

Вузли пуску та гальмування електродвигунів, що працюють за принципом струму.

Керування електроприводами за принципом струму базується на контролі електричного струму в колах електродвигуна. Оскільки струм безпосередньо пов'язаний із навантаженням, пусковими та гальмівними режимами, він є інформативним параметром для побудови схем автоматичного керування.

У релейно-контакторних системах струмовий принцип реалізується за допомогою:

- струмових реле (максимальних, мінімальних);
- теплових реле;
- електромагнітних розчіплювачів;
- вимірювальних трансформаторів струму.

Застосування струмового принципу доцільне в електроприводах:

- з важким пуском;
- зі змінним або ударним навантаженням;
- у механізмах підйому, транспортування та подрібнення.

Вузли пуску електродвигунів за принципом струму

Під час пуску асинхронного електродвигуна струм у кілька разів перевищує номінальний. Ця особливість використовується для автоматичного керування пусковими процесами.

Типовий принцип роботи:

1. При вмиканні двигуна струм у колі зростає до пускового значення.
2. Струмове реле перебуває у збудженому стані.
3. У міру розгону двигуна струм зменшується.
4. При досягненні заданого порогового значення струму реле перемикає контакти, змінюючи режим пуску.

На практиці це використовується для:

- виведення пускових резисторів;
- переходу з пускового режиму в робочий;
- керування ступінчастим пуском.

Перевагою такого підходу є адаптація до реального навантаження, на відміну від жорстко заданих часових алгоритмів.

Струмові реле в схемах релейно-контакторного керування

Струмове реле — це апарат, який реагує на зміну струму в контрольованому колі та замикає або розмикає свої контакти при досягненні заданого значення.

Основні типи струмових реле:

- максимальні — спрацьовують при перевищенні струму;
- мінімальні — реагують на зниження струму;
- диференційні — порівнюють струми в різних гілках.

У схемах електроприводів максимальні струмові реле виконують подвійну функцію:

- керуючу — участь у пускових і гальмівних алгоритмах;
- захисну — запобігання перевантаженню та аварійним режимам.

Гальмування електродвигунів за принципом струму

Принцип струму широко використовується і в гальмівних вузлах. Особливо це характерно для схем гальмування противмиканням.

Алгоритм роботи:

1. Після команди «Стоп» двигун переводиться в режим противмикання.
2. У колі виникає значний гальмівний струм.
3. Струмове реле контролює величину цього струму.
4. При зменшенні струму до заданого значення реле вимикає гальмівний контактор.

Такий підхід дозволяє:

- уникнути реверсу обертання;
- забезпечити автоматичне завершення гальмування;
- знизити теплове навантаження на обмотки двигуна.

Роль теплових реле у струмових вузлах

Теплові реле є важливою складовою струмових схем і реагують не на миттєве значення струму, а на його тепловий ефект.

Основні функції теплових реле:

- захист електродвигуна від тривалого перевантаження;
- запобігання перегріву обмоток;
- відключення привода при заклинюванні механізму.

У релейно-контакторних схемах теплове реле зазвичай:

- вмикається послідовно з двигуном;
- розмикає коло керування контактора при перевищенні допустимого струму.

Переваги та недоліки струмового принципу керування

Переваги:

- урахування реального навантаження;
- підвищена надійність пуску важконавантажених механізмів;
- поєднання функцій керування та захисту.

Недоліки:

- залежність від коливань напруги живлення;
- потреба в точному налаштуванні струмових уставок;
- можливість помилкових спрацювань при перехідних процесах.

Вузли пуску та гальмування електродвигунів за принципом шляху.

Сутність принципу керування за шляхом

Керування електроприводами за принципом шляху (положення) базується на контролі переміщення робочого органа або вала механізму. На

відміну від часових, швидкісних і струмових схем, у цьому випадку керуючий вплив формується при досягненні заданого положення, незалежно від часу, швидкості чи струму.

Основу таких вузлів становлять кінцеві та позиційні вимикачі, які механічно або безконтактно реагують на переміщення елементів механізму.

Принцип шляху широко застосовується в електроприводах:

- підйомно-транспортних машин (крани, ліфти, талі);
- конвеєрних систем;
- верстатів з поступальними переміщеннями;
- механізмів подачі та позиціонування.

Кінцеві вимикачі як основні елементи керування

Кінцевий вимикач — це апарат, який змінює стан своїх контактів при досягненні рухомим елементом заданого положення.

За конструкцією кінцеві вимикачі поділяються на:

- важільні;
- штовхальні;
- роликові;
- кулачкові;
- безконтактні (індуктивні, магнітні).

У релейно-контакторних схемах кінцеві вимикачі зазвичай:

- вмикаються в коло керування контактора;
- розмикають або замикають коло при досягненні заданого положення;
- виконують як керуючі, так і захисні функції.

Вузли пуску електродвигунів за принципом шляху

Принцип шляху використовується не лише для зупинки, але й для автоматичного пуску електродвигуна.

Типовий приклад:

- електродвигун вмикається лише тоді, коли робочий орган знаходиться у початковому положенні;
- початкове положення контролюється кінцевим вимикачем;
- при відхиленні від дозволеної зони пуск блокується.

Такі вузли застосовуються:

- у механізмах зворотно-поступального руху;
- у транспортерах із фіксованими позиціями;
- у верстатних приводах подачі.

Це забезпечує:

- виключення помилкового пуску;
- підвищення безпеки обслуговування;
- коректну послідовність роботи механізмів.

Гальмування електродвигунів за принципом шляху

Найпоширенішим застосуванням принципу шляху є автоматична зупинка або гальмування електродвигуна при досягненні заданої точки переміщення.

Алгоритм роботи:

1. Під час руху механізму кінцевий вимикач перебуває у вихідному стані.
2. При досягненні контрольної точки спрацьовує вимикач.
3. Контакт вимикача розмикає коло керування контактора.
4. Двигун вимикається або переводиться в гальмівний режим.

У складніших схемах:

- перший вимикач вмикає режим гальмування;
- другий — забезпечує повну зупинку.

Такий підхід широко використовується у:

- підйомних механізмах (верхні та нижні обмежувачі);
- координатних приводах;
- транспортних візках.

Комбіновані схеми за принципом шляху

У практиці часто застосовуються комбіновані вузли, де принцип шляху поєднується з:

- часовим принципом;
- контролем швидкості;
- струмовим захистом.

Приклад:

- при досягненні заданого положення кінцевий вимикач вмикає режим гальмування;
- завершення гальмування контролюється струмовим або швидкісним реле;
- повне вимкнення відбувається через контактор.

Це дозволяє:

- підвищити точність зупинки;
- зменшити ударні навантаження;
- забезпечити надійну роботу електропривода.

Переваги та недоліки керування за принципом шляху

Переваги:

- чітка прив'язка до положення механізму;
- висока надійність і простота реалізації;
- підвищення безпеки експлуатації.

Недоліки:

- механічний знос контактних вимикачів;
- обмежена точність при великих швидкостях;
- потреба в періодичному регулюванні положення датчиків.

Висновки.

1. Релейно-контакторні системи керування електроприводами є базовими засобами автоматизації, що широко застосовуються в промисловості завдяки простоті, надійності та ремонтпридатності.
2. Керування електроприводами за принципом часу ґрунтується на використанні реле часу та дозволяє реалізовувати послідовний пуск і гальмування електродвигунів без урахування їх фактичного стану, що обмежує точність, але спрощує схемні рішення.
3. Системи керування за принципом швидкості забезпечують наявність зворотного зв'язку, що підвищує стабільність і безпечність пускових та гальмівних режимів, особливо при змінних навантаженнях.
4. Керування за принципом струму дозволяє враховувати реальні електромагнітні процеси в електродвигуні, поєднуючи функції керування та захисту, що є особливо важливим для важконавантажених механізмів.
5. Керування за принципом шляху забезпечує чітку прив'язку роботи електропривода до положення робочого органа, підвищує точність позиціонування та рівень безпеки експлуатації.
6. На практиці найбільш ефективними є комбіновані релейно-контакторні схеми, у яких поєднуються часові, швидкісні, струмові та позиційні принципи керування.

Контрольні питання.

1. Яке призначення релейно-контакторної апаратури в системах керування електроприводами?
2. У чому полягає принцип керування електроприводом за часом?
3. Які функції виконують реле часу в схемах пуску електродвигунів?
4. Опишіть роботу схеми пуску двигуна за принципом «зірка – трикутник».
5. У чому полягає відмінність між часовим і швидкісним принципами керування?
6. Які пристрої застосовуються для реалізації керування за швидкістю?
7. Призначення тахогенератора в релейно-контакторних схемах.
8. Які особливості гальмування електродвигуна за принципом швидкості?
9. Поясніть принцип керування електроприводом за струмом.
10. Які типи струмових реле використовуються в електроприводах?
11. Яку роль відіграють теплові реле в струмових схемах керування?
12. У чому полягає принцип гальмування електродвигуна противмиканням?
13. Що таке керування електроприводом за принципом шляху?
14. Які типи кінцевих вимикачів застосовуються в електроприводах?
15. Як реалізується автоматична зупинка електродвигуна за положенням механізму?
16. У яких механізмах найчастіше застосовується керування за принципом шляху?
17. Переваги та недоліки керування за принципом часу.
18. Переваги комбінованих схем керування електроприводами.

Використана література.

Василега П. О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 290 с.

Вахоніна Л.В., Циганов О.М., Мардзявко В.А., Руденко А.Ю. Електричні машини та апарати : конспект лекцій. Миколаїв : Миколаївський національний аграрний університет, 2023. 367 с.

Електропривод виробничих машин і механізмів : навчальний посібник / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко, В. Я. Бунько, В. Ю. Рамш; за ред. О.Ю. Синявського. Київ : ФОП Ямчинський О.В., 2020. 444 с.

Конспект лекцій з дисципліни «Системи керування електроприводами» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / уклад. В. Б. Нізімов. Кам'янське : ДДТУ, 2019. 124 с.

ТЕМА 16. ТИПОВІ ВУЗЛИ СХЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗМІННОГО ТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основні схеми вузлів статорних ланцюгів асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором. Вузли пускових роторних опорів асинхронних машин. Вузли схем, що забезпечують запуск синхронних машин. Вузли схем головних кіл машин постійного струму. Вузли захисту, що застосовуються в системах автоматичного керування електроприводами. Блокування та сигналізації, що застосовуються в системах автоматичного керування електроприводами. Керування асинхронним двигуном з кулачковим контролером. Магнітні контролери для управління двигунами постійного та змінного струмів

Принципи побудови керування двигуна постійного струму (ДПС)

Поряд із розвитком і розширенням застосування безконтактних систем керування електроприводами, у промисловості все ще широко експлуатуються схеми релейно-контакторного керування. Такі схеми, як правило, використовуються у розімкнених системах регулювання швидкості й забезпечують виконання низки основних функцій — автоматичний пуск і зупинка двигуна, узгодження роботи на різних ступенях швидкості, реверсування, гальмування, а також захист електроприводу у разі аварійних режимів. Крім того, вони дозволяють здійснювати взаємне блокування між кількома приводами, забезпечуючи узгоджену роботу технологічних агрегатів.

До основних переваг релейно-контакторних схем керування належать їхня конструктивна простота, зручність у проектуванні та розрахунках, а також легкість у технічному обслуговуванні. Для їх наладки не потрібно залучати висококваліфікований персонал, що робить такі системи придатними для експлуатації у виробничих умовах із невисокими вимогами до точності керування.

Разом з тим, такі схеми мають низку суттєвих недоліків, серед яких:

- різке зростання складності при необхідності підвищення якості регулювання;
- великі габарити, значна маса та висока вартість станцій керування, особливо для електродвигунів середньої й великої потужності;
- неможливість застосування в пожежо- та вибухонебезпечних середовищах;
- низька точність підтримання заданих режимів при дії зовнішніх збурень.

Незважаючи на вказані недоліки, релейно-контакторні системи керування продовжують широко застосовуватись у складі електроприводів, до яких не висуваються високі вимоги щодо точності регулювання в динамічних режимах. Такі системи залишаються ефективним і надійним рішенням для простих технологічних механізмів, де основними критеріями є економічність, простота обслуговування та довговічність елементів схеми.

Схеми пуску двигунів постійного струму (ДПС) призначені для автоматизації процесу розгону електроприводу, обмеження пускових струмів та запобігання можливим помилкам під час запуску.

Пуск двигуна паралельного або незалежного збудження зазвичай здійснюється за допомогою пускового резистора, увімкненого послідовно в коло якоря. Цей резистор служить для обмеження струму в момент увімкнення. У міру розгону двигуна окремі секції резистора поетапно вимикаються. Після завершення процесу пуску резистор повністю виводиться з кола, і двигун працює на природній механічній характеристиці (рис. 16.1).

На рис.16.2 наведено пускову діаграму двигуна постійного струму з трьома ступенями пускового реостата. Із цієї діаграми видно, що послідовне вимикання резисторів під час розгону двигуна має відбуватись при досягненні певних кутових швидкостей обертання ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$), відповідних струмів (I_1, I_2) або через встановлені проміжки часу (t_1, t_2, t_3). Отже, керування процесом пуску може здійснюватися за однією з функцій — швидкості, струму чи часу. У деяких випадках застосовується також керування у функції шляху руху робочого органу механізму, хоча такий підхід використовується досить рідко.

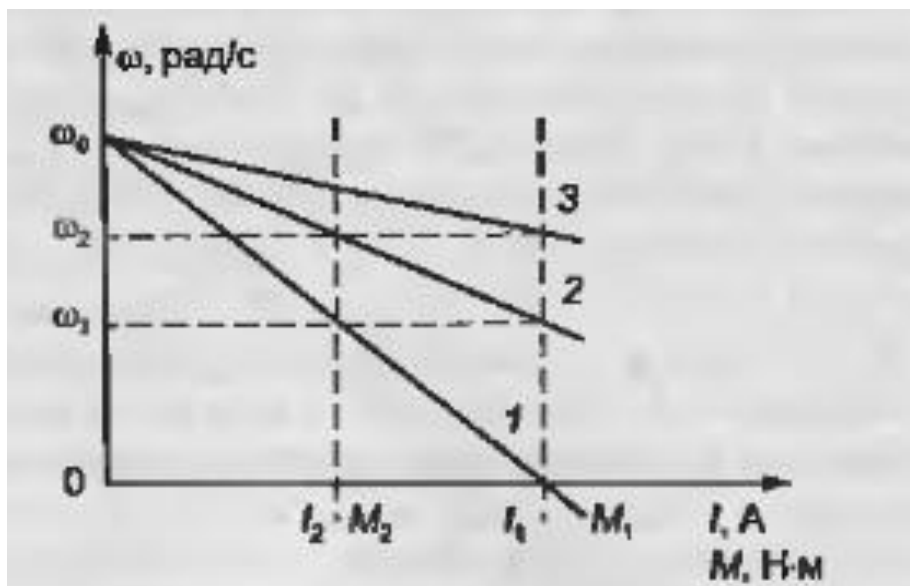


Рисунок 16.1 – Механічні характеристики ДПС паралельного збудження (ω - кутова швидкість обертання, I_1, M_1 - пікові значення струму та моменту, I_2, M_2 - значення струму та моменту переключення)

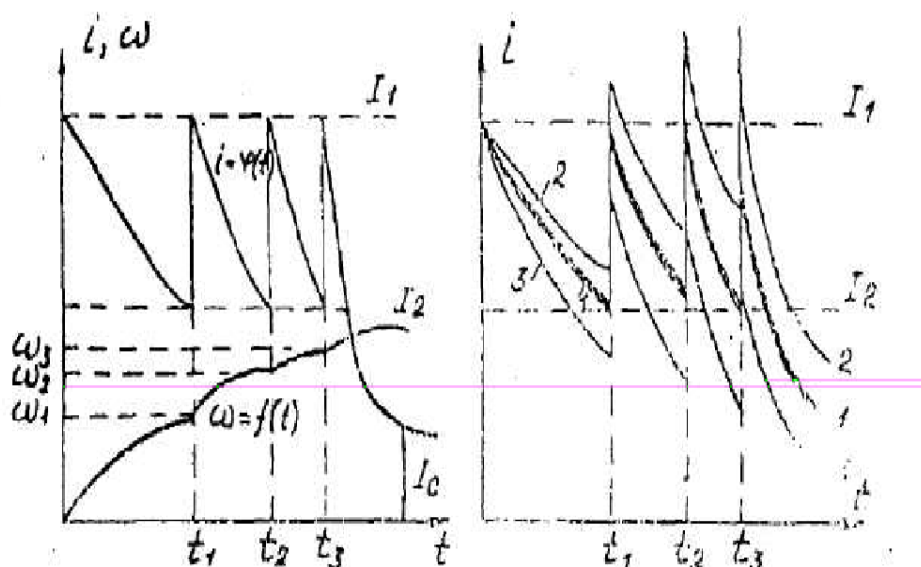
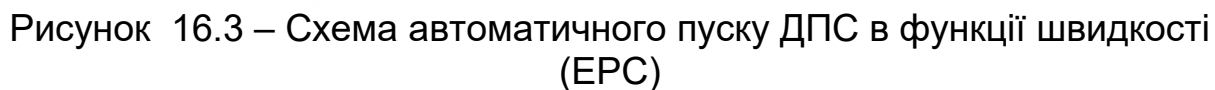


Рисунок 16.2 – Криві вимірів струму і швидкості при триступеновому пуску ДПС у функції часових для розрахункового (1) завищеного (2) і заниженого (3) навантаження на валу двигуна

В сучасних електроприводах двигунів постійного струму застосовується кілька типових принципів побудови схем автоматичного пуску. Вибір конкретного методу залежить від технологічних вимог, динамічних характеристик приводу та необхідної точності регулювання. Найпоширенішими є схеми, у яких процес пуску здійснюється у функції кутової швидкості (ЕРС), струму або часу. Кожен із цих способів має власні переваги й обмеження, що визначають доцільність їх застосування в різних умовах експлуатації.

Схеми рис.16.3 – рис.16.5 призначені для автоматичного пуску (кнопка SB1) двигуна постійного струму паралельного (незалежного) збудження у функції швидкості (ЕРС) – рис.16.3, струму – рис.16.4, часу – рис.16.5 і динамічного гальмування по команді «Стоп» здійснюється кнопкою SB2. У схемі передбачене ручне регулювання потоку машини R_v , нульової КМ і максимально-струмовий КА захист. Обмеження пускових струмів здійснюється резисторами R_1 , R_2 , R_3 , включеними послідовно в якорне коло і шунтованими у міру розгону двигуна залежно від прийнятого принципу керування пуском. Схеми рис.16.3 і рис.16.5 здійснюють динамічне гальмування по команді «Стоп» (кнопка SB2). Обмотки збудження LM машин зашунтовані розрядними резисторами R_p , що знімають перенапругу при комутації.

Керування пуском двигуна у функції кутової швидкості (ЕРС)



Під час пуску контактори KV_1 , KV_2 , KV_3 спрацьовують при досягненні розрахункових значень ЕРС, що відповідають певним швидкостям обертання — ω_1 , ω_2 , ω_3 , послідовно шунтуючи пускові резистори. Після завершення розгону всі контактори залишаються ввімкненими на напругу мережі, а двигун переходить у сталий режим роботи на природній механічній характеристиці.

Керування пуском двигуна у функції струму

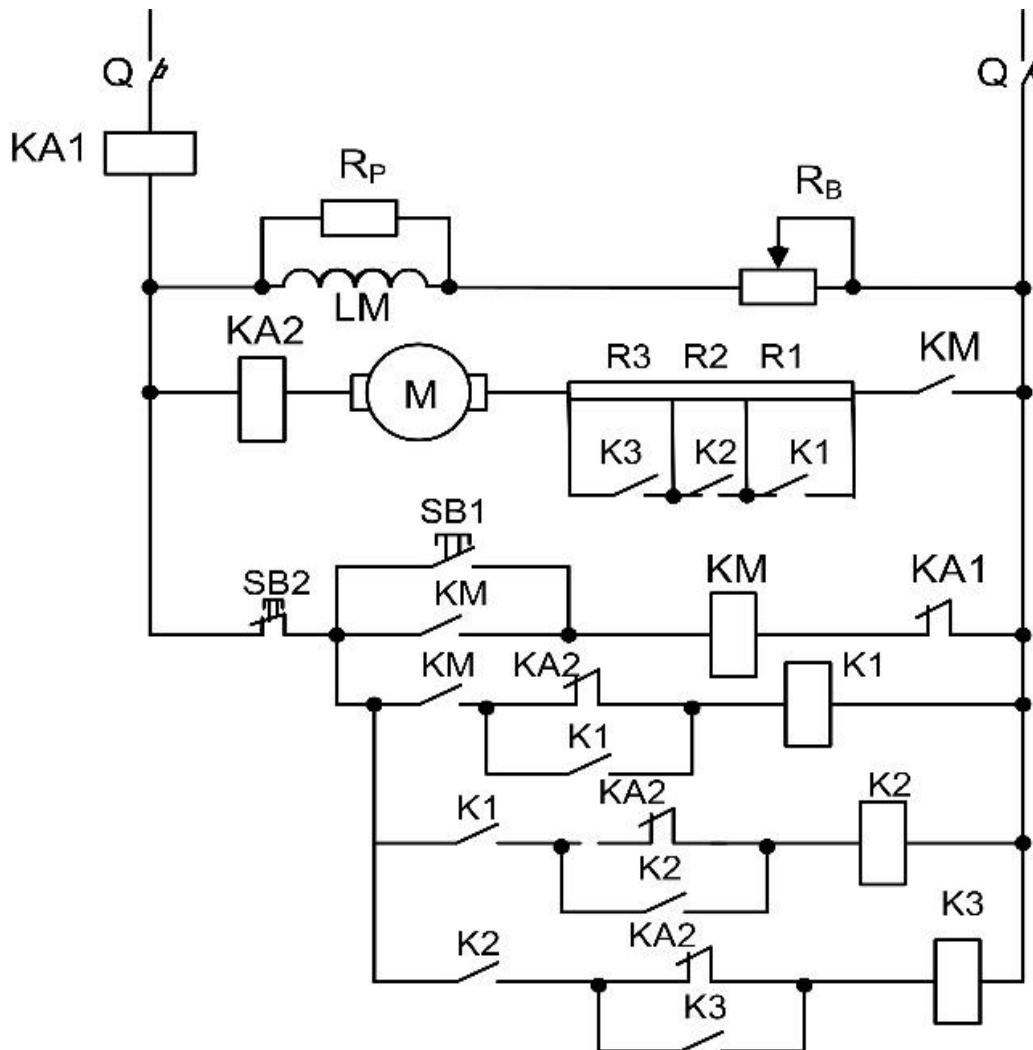


Рисунок 16.4 – Схема автоматичного пуску ДПС в функції струму

Керування пуском двигуна у функції струму базується на контролі величини струму в якорному колі за допомогою спеціальних струмових реле (рис. 16.4). У найпростішому варіанті схема містить одне струмове реле KA2, ввімкнене послідовно в коло якоря. Його розмикаючі контакти встановлюються у колах контактів прискорення K1, K2, K3. Під час пуску реле спрацьовує від великого пускового струму, не дозволяючи вмикати контактори прискорення. У міру розгону двигуна струм поступово зменшується, реле відпускає, контакти замикаються, і вмикається перший контактор прискорення K1, який шунтує резистор R1. Цей процес повторюється для наступних ступенів — R2 і R3, що забезпечує поступове виведення резисторів з кола.

Недоліком таких схем є залежність процесу пуску від статичного моменту навантаження. Якщо момент перевищує розрахунковий, струм не встигає знизитися до рівня спрацьовування реле, через що пусковий резистор може залишатися у колі занадто довго, спричиняючи перегрівання і можливі пошкодження елементів.

Керування пуском двигуна у функції часу

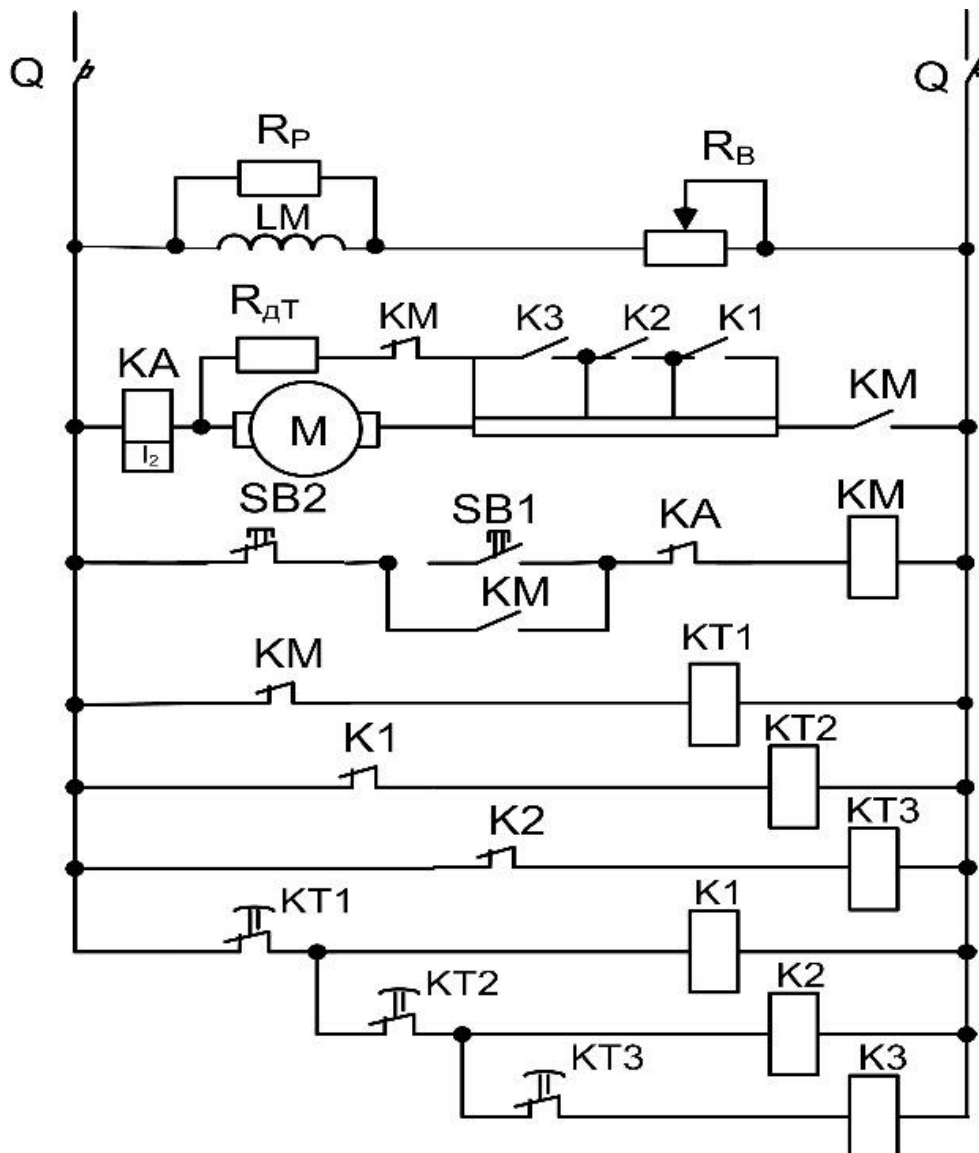


Рисунок 16.5 – Схема автоматичного пуску ДПС в функції часу

Керування пуском двигуна у функції часу (рис. 16.5) передбачає автоматичне виведення ступенів пускового резистора через визначені часові інтервали, встановлені відповідно до пускових характеристик $\omega = f(t)$ і $I = f(t)$. Для реалізації цього принципу використовуються реле часу, які керують контактами прискорення K_1 , K_2 , K_3 незалежно від фактичних значень струму або швидкості.

Перевагою такого підходу є простота та висока надійність у роботі, адже пуск відбувається за стабільним часовим алгоритмом, що не залежить від зміни навантаження. Проте при значних відхиленнях фактичного моменту опору від розрахункового можливі певні коливання струму або подовження часу розгону.

Такі схеми набули широкого застосування в промислових електроприводах завдяки використанню електромагнітних, електронних або

пневматичних реле часу, які забезпечують точне дотримання заданих інтервалів пуску та захист двигуна від перевантажень.

Схеми гальмування двигунів постійного струму

Схеми гальмування двигунів постійного струму (ДПС) призначені для зупинки електроприводу або зниження швидкості його обертання в керований спосіб. Найпоширенішими є режими динамічного гальмування та гальмування противмиканням, які реалізуються за допомогою комутаційних елементів — контакторів, реле струму чи швидкості.

Схеми гальмування двигунів постійного струму (ДПС) застосовуються для плавного зниження швидкості обертання або повної зупинки електропривода. Залежно від характеру процесу розрізняють динамічне гальмування та гальмування противмиканням. У динамічному режимі кінетична енергія ротора перетворюється в електричну й розсіюється у вигляді тепла в гальмівному резисторі. При гальмуванні противмиканням полярність напруги в колі якоря змінюється на протилежну, завдяки чому створюється гальмівний момент, спрямований проти обертання вала.

У типових схемах (рис. 16.6, а–в) процес гальмування реалізується автоматично після натискання кнопки SB2 «Стоп», а момент і тривалість гальмування визначаються характеристиками кола, у яке підключається якір двигуна.

У схемах динамічного гальмування двигуна постійного струму реалізується принцип перетворення механічної енергії обертання в теплову енергію, що розсіюється у гальмівному резисторі. На рис.16.6, а зображено схему гальмування у функції кутової швидкості (EPC). Після відключення головного контактора КМ його допоміжні контакти замикають коло реле гальмування К1, яке спрацьовує й умикає контактор К2. Останній під'єднує якір двигуна до гальмівного резистора $R_{дт}$, створюючи гальмівний момент, що діє до зниження швидкості до мінімального значення, при якому реле К1 розмикає коло К2, завершуючи гальмування.

На рис.16.6, б подано схему гальмування у функції часу. Тут процес зупинки керується реле часу, яке забезпечує необхідну витримку для повної зупинки двигуна. Оскільки гальмівний момент пропорційний кутовій швидкості, зі зниженням швидкості ефективність гальмування поступово зменшується, що збільшує його тривалість. Для скорочення часу зупинки використовують додаткові гальмівні ступені, які підвищують гальмівний струм при переході між ними.

Гальмування противмиканням використовується переважно в реверсивних електроприводах, де після зупинки двигуна часто виконується його пуск у протилежному напрямку. Принцип дії такого гальмування полягає в тому, що напруга, прикладена до кола якоря, змінює свою полярність на протилежну, а електрорушійна сила двигуна при цьому діє в тому ж напрямку, що й напруга мережі. Це призводить до значного збільшення струму, який створює гальмівний момент, спрямований проти руху ротора.

Для обмеження цього струму послідовно з пусковими резисторами вмикається резистор противмикання, який шунтується реле KV у момент завершення гальмування (рис. 16.6, в). Така схема дозволяє ефективно контролювати гальмівний процес, знижуючи механічні навантаження на вал двигуна та елементи передачі.

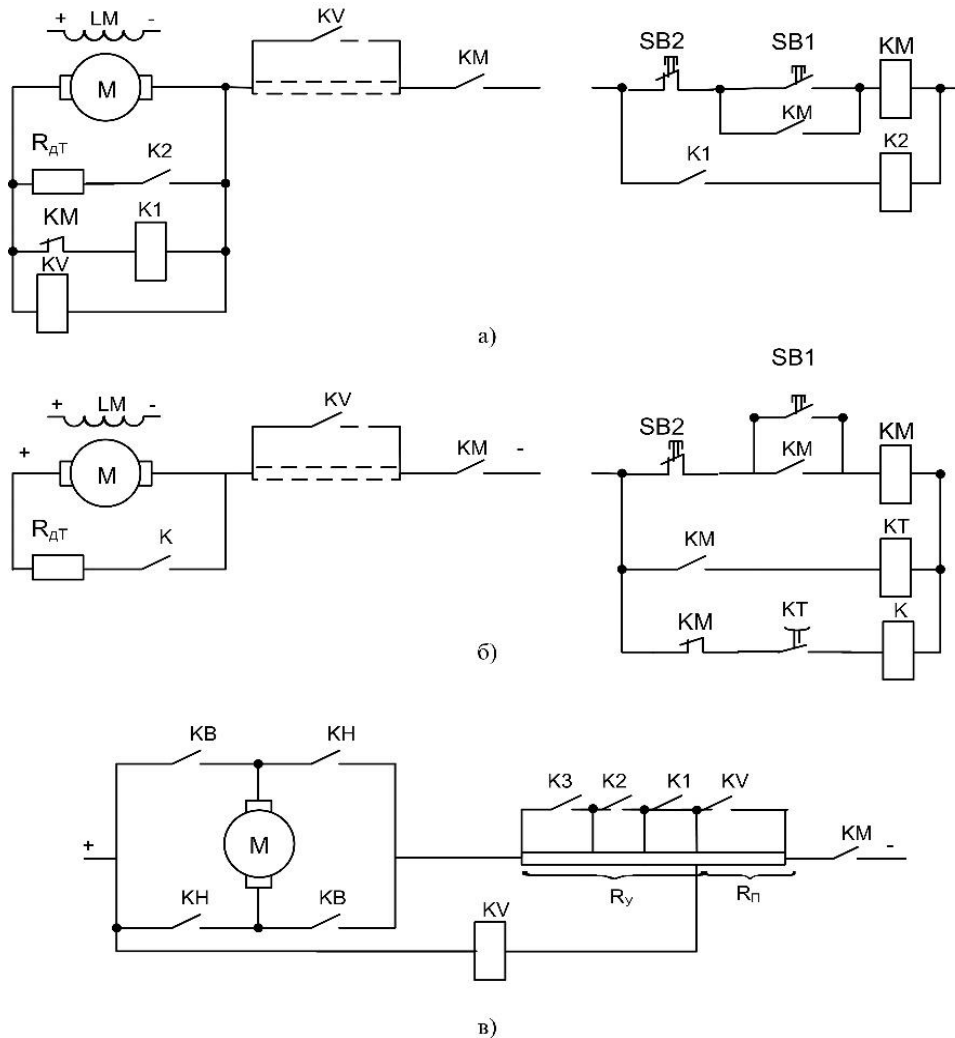


Рисунок 16.6 – Схема автоматичного гальмування ДПС

Типові вузли та схеми керування асинхронним двигуном

Керування асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором.

У промислових електроприводах найширше застосовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором (АДКР). На рис.16.7 подано одну з найпоширеніших схем керування нереверсивним асинхронним двигуном, яка забезпечує надійний запуск, зупинку та захист від повторного самозапуску.

Під час натискання кнопки SB1 «Пуск» подається напруга на котушку магнітного пускача (контактора) KM, унаслідок чого замикаються його силові контакти КК, і двигун під'єднується до мережі. Одночасно спрацьовує блок-контакт KM, який шунтує кнопку «Пуск» і забезпечує нульовий захист — у разі короткочасного зникнення напруги двигун не запускається

самостійно після її відновлення. Вимкнення електродвигуна здійснюється натисканням кнопки SB2 «Стоп», що розмикає коло живлення котушки пускача, припиняючи подачу напруги на статор.

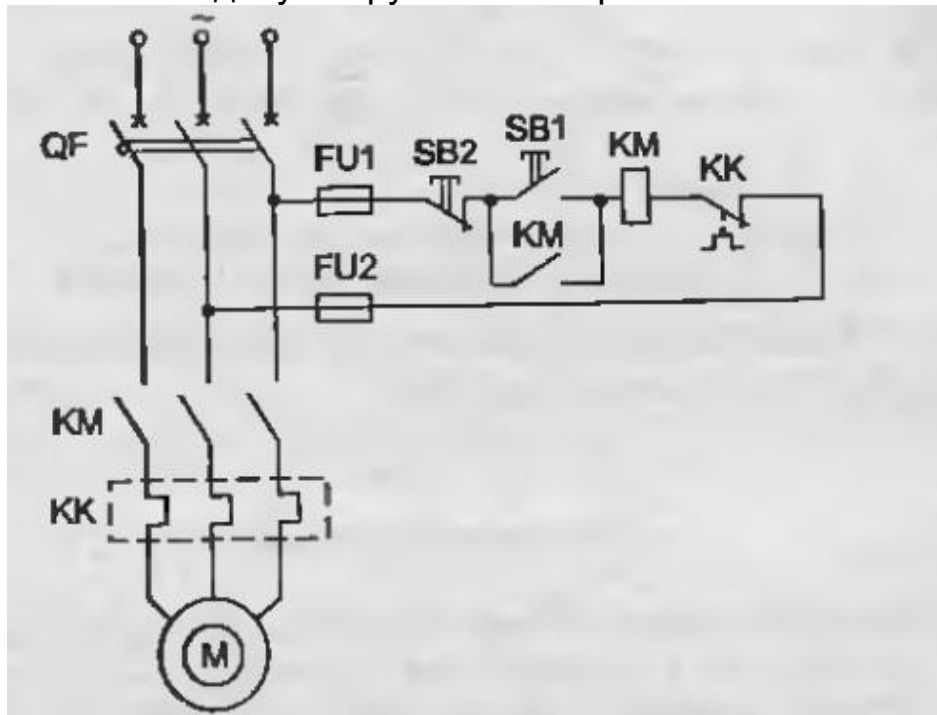


Рисунок 16.7 – Схема керування АДКР з нереверсивним пускачем

На рис.16.8 показано схему керування асинхронним двигуном з реверсивним магнітним пускачем, яка дозволяє змінювати напрям обертання ротора. Для цього в схемі використано два контактори — KM1 і KM2, що забезпечують підключення обмоток статора до мережі із зміненим чергуванням фаз.

Під час натискання кнопки SB1 «Пуск» спрацьовує контактор KM1, який підключає двигун до трифазної мережі в прямому напрямі. Для зміни напрямку обертання (реверсу) спочатку натискається кнопка SB3 «Стоп», що розриває коло KM1, після чого натискається кнопка SB2 «Реверс», яка вмикає контактор KM2. При цьому чергування фаз змінюється, і двигун починає обертатися у зворотному напрямку.

Для запобігання одночасному вмиканню обох контакторів у схемі передбачено електричне блокування за допомогою розмикаючих контактів KM1 та KM2, що гарантує безпечну роботу системи.

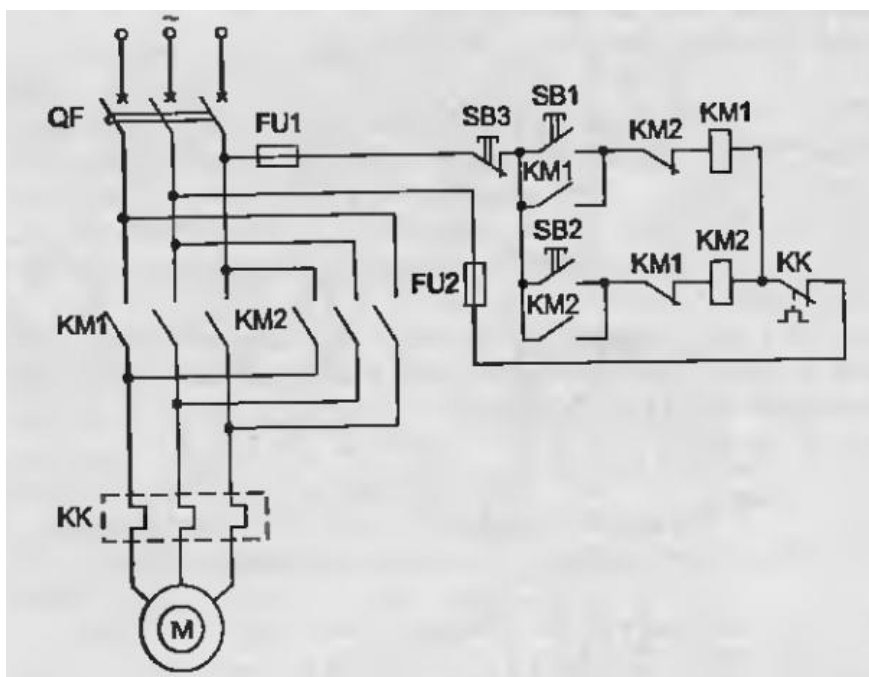


Рисунок 16.8 – Схема керування АДКР з реверсивним пускачем-

Вузли та схеми гальмування асинхронного електродвигуна

Динамічне гальмування асинхронного двигуна здійснюється шляхом відключення його від трифазної мережі змінного струму та подальшого підключення обмоток статора до джерела постійного струму. У цьому режимі в обмотках статора створюється постійний магнітний потік, який, взаємодіючи зі струмом у роторі, генерує гальмівний момент, що зупиняє двигун.

На рис.16.9 наведено схему прямого пуску асинхронного двигуна з динамічним гальмуванням у функції часу. Під час запуску двигуна через контактор КМ1 одночасно замикається коло живлення реле часу КТ, яке готує систему до подальшого гальмування. Для зупинки двигуна натискається кнопка SB2 «Стоп», при цьому контактор КМ1 знеструмлюється, розмикаючи коло статора, і одночасно замикається коло КМ2, що підключає статор до джерела постійного струму.

Реле часу КТ забезпечує витримку, необхідну для повної зупинки двигуна, після чого коло КМ2 розмикається. Інтенсивність гальмування регулюється резистором R, а електричне блокування між контактами КМ1 і КМ2 запобігає можливості одночасного підключення статора до різних джерел живлення.

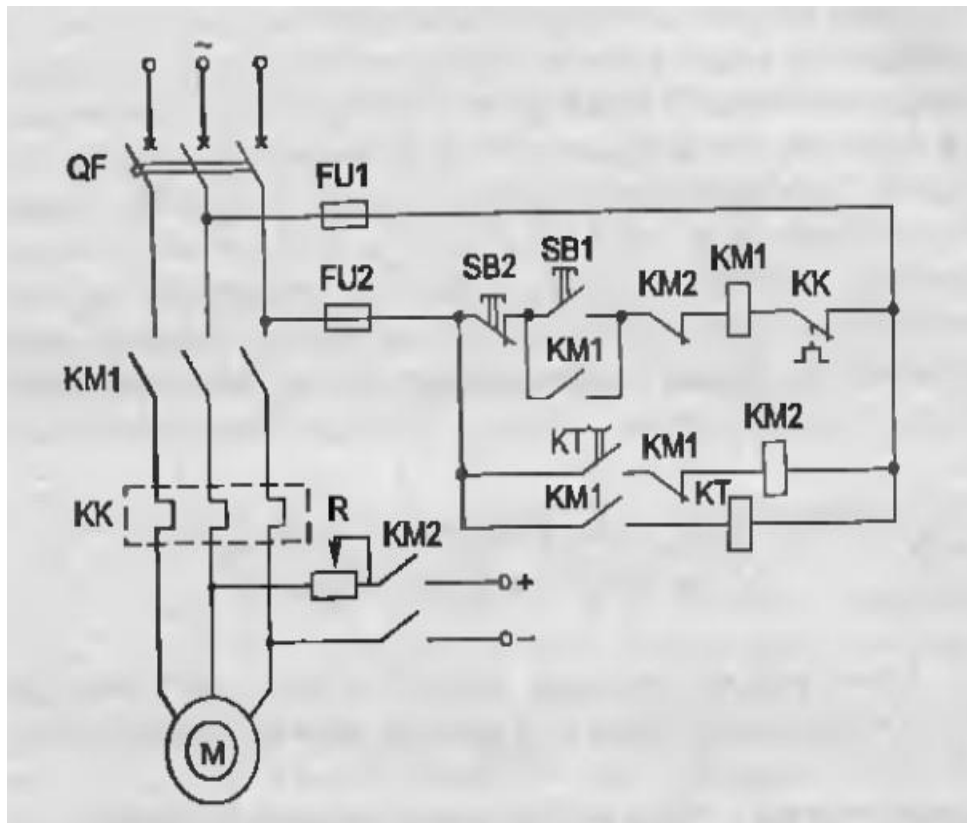


Рисунок 16.9 – Схема керування АДКР з динамічним гальмуванням в функції часу

Керувати динамічним гальмуванням можна в функції швидкості за допомогою реле контролю швидкості SR.

На рис.16.10 представлено схему керування асинхронним двигуном з динамічним гальмуванням у функції швидкості. Принцип її дії полягає в автоматичному відключенні двигуна від трифазної мережі та підключенні його до джерела постійного струму після натискання кнопки SB2 «Стоп».

Під час пуску контактор KM1 замикає силові контакти, і двигун працює у звичайному режимі. Для гальмування використовується реле контролю швидкості SR, яке замикає або розмикає контакти залежно від фактичної кутової швидкості ротора. Коли швидкість знижується до встановленого мінімального рівня, контакт SR розмикається, унаслідок чого контактор KM2 знеструмлюється і двигун відключається від мережі постійного струму.

Завдяки такій побудові схема забезпечує автоматичне завершення гальмування при майже повній зупинці ротора, зменшує теплові навантаження на обмотки та запобігає перевищенню допустимого гальмівного струму

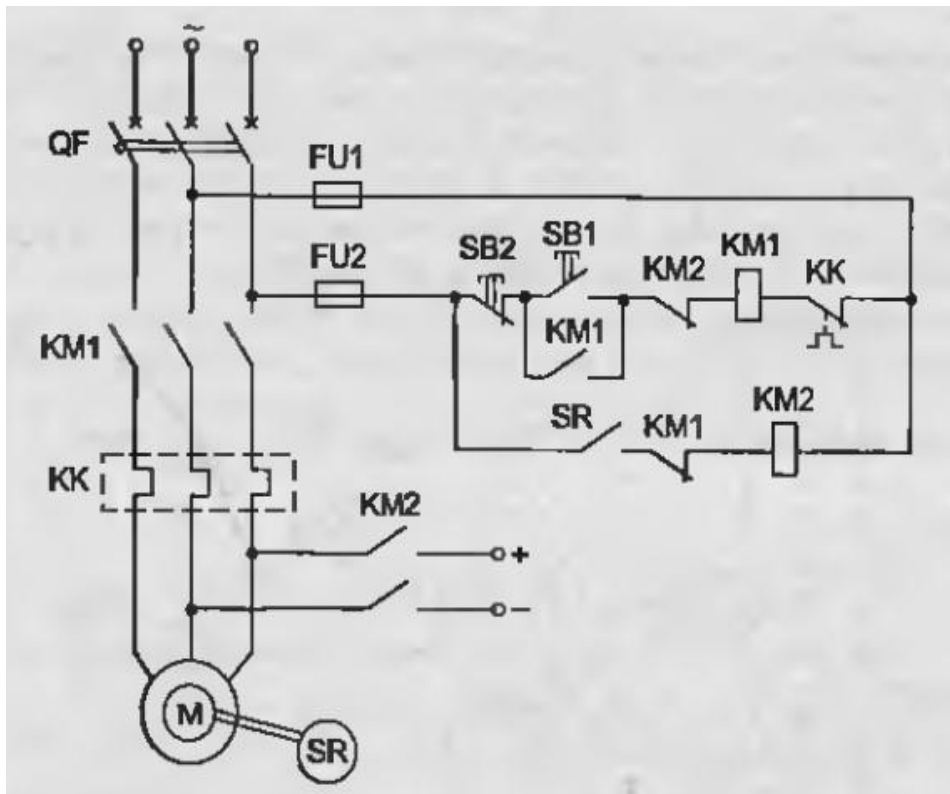


Рисунок 16.10 – Схема керування АДКР з динамічним гальмуванням в функції швидкості

Гальмування противмиканням асинхронного двигуна (рис. 16.11) реалізується шляхом зміни порядку чергування фаз у колі статора, що призводить до створення гальмівного моменту, спрямованого проти обертання ротора. Процес гальмування здійснюється автоматично з урахуванням фактичної швидкості двигуна, яку контролює реле швидкості SR.

Під час пуску натисканням кнопки SB1 «Пуск» спрацьовує контактор KM1, який підключає статор до мережі трифазного струму. При натисканні кнопки SB2 «Стоп» контактор KM1 розмикається, а контактор KM2 вмикається, змінюючи порядок чергування фаз, завдяки чому двигун переходить у режим противмикання. Коли швидкість обертання ротора знижується до мінімального значення, контакт реле SR розмикається, роз'єднуючи коло KM2 і відключаючи двигун від мережі.

У схемі реалізовано електричне блокування, що запобігає одночасному вмиканню контактів KM1 і KM2, забезпечуючи безпечне перемикання режимів роботи.

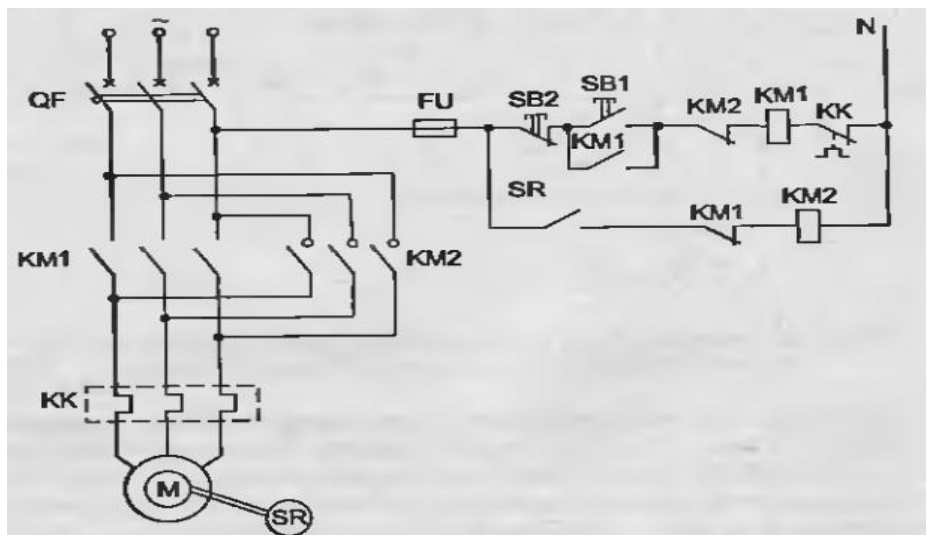


Рисунок 16.11 – Схема керування АДКР з гальмуванням противмиканням

Вузли та схеми керування асинхронним двигуном з фазним ротором.

Асинхронні двигуни з фазним ротором широко застосовуються в електроприводах, де необхідно плавно регулювати швидкість або забезпечити м'який пуск. Пуск таких двигунів здійснюється з використанням резисторів у колі ротора, які обмежують пусковий струм і дозволяють підтримувати задане прискорення під час розгону. У процесі збільшення швидкості резистори поступово виводяться з кола, а після завершення пуску — повністю шунтуються, переводячи двигун на природну механічну характеристику.

На рис.16.12 подано схему пуску двигуна з фазним ротором у два ступені. У ній одночасно подається напруга на силові кола та кола керування за допомогою вимикача QF, а послідовність виведення резисторів визначається заданими інтервалами часу..

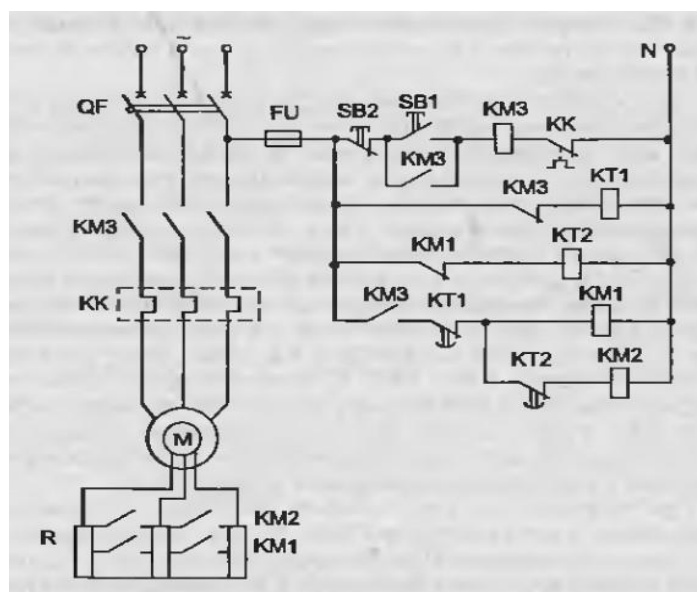


Рисунок 16.12 – Схема пуску двигуна з фазним ротором

У схемі керування асинхронним двигуном з фазним ротором у функції часу використовується послідовність спрацювання реле часу КТ1 і КТ2, які визначають моменти виведення пускових резисторів. При подачі напруги на коло керування обидва реле спрацювають і розмикають свої контакти. Натискання кнопки SB1 «Пуск» активує контактор КМ3, який вмикає двигун із повністю введеними резисторами в коло ротора, тоді як контактори КМ1 і КМ2 залишаються вимкненими.

Після закінчення витримки часу КТ1 замикає свій контакт, умикаючи контактор КМ1, який шунтує першу секцію пускового резистора. Одночасно розмикається контакт КМ1 у колі КТ2, і після завершення витримки часу другого реле вмикається контактор КМ2, що шунтує другу секцію резистора. У результаті двигун поступово розганяється до номінальної швидкості, а резистори повністю виводяться з кола, забезпечуючи плавний перехід на сталий режим роботи.

У схемах керування асинхронним двигуном з фазним ротором у функції струму (рис. 16.13) процес пуску контролюється за допомогою струмових реле КА1 і КА2, які реагують на зміну струму в колі ротора. При запуску двигуна через контактор КМ3 у колі ротора повністю введені пускові резистори. Під дією великого пускового струму реле КА1 спрацюває, розмикаючи контакт у колі КМ1, запобігаючи його передчасному ввімкненню.

У міру розгону двигуна струм ротора поступово зменшується, і при досягненні встановленого мінімального значення КА1 відпускає, замикаючи свій контакт — це призводить до спрацювання КМ1, який шунтує першу секцію пускового резистора. Аналогічно діє реле КА2, що контролює наступний ступінь: воно відпускає при подальшому зниженні струму, вмикаючи КМ2, який шунтує другу секцію резистора.

Таким чином, пуск двигуна відбувається автоматично та поступово, залежно від зміни струму в роторі, що забезпечує стабільний режим прискорення та захист від перевантажень. Зупинка двигуна здійснюється натисканням кнопки SB2 «Стоп», яка розриває коло живлення КМ3, відключаючи двигун від мережі.

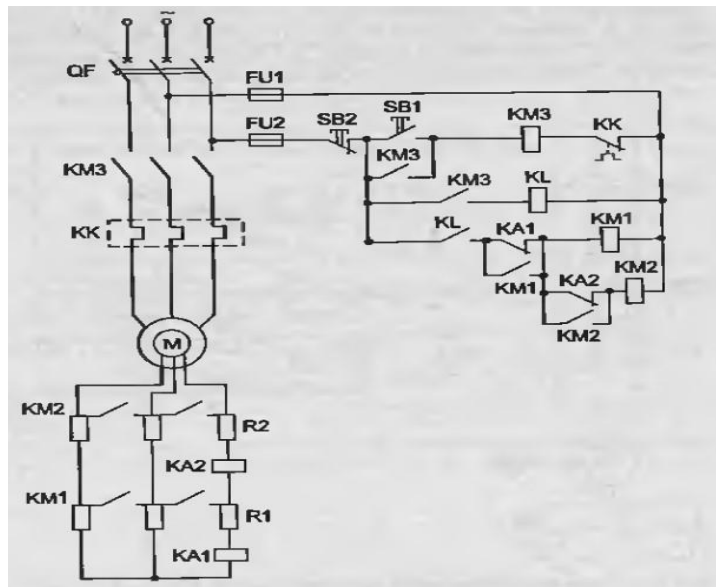


Рисунок 16.13 – Схема пуску двигуна з фазним ротором в функції струму

Схема пуску асинхронного двигуна з фазним ротором в функції часу і динамічним гальмуванням в функції швидкості показана на рис.16.14.

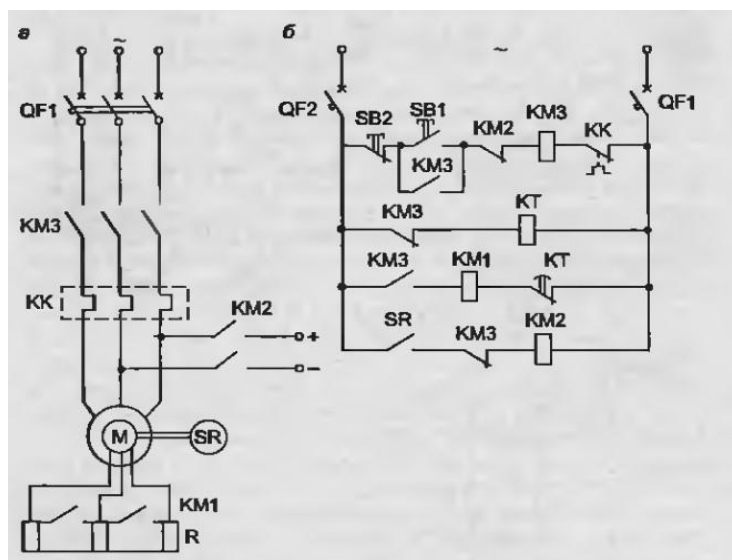


Рисунок 16.14 – Схема пуску двигуна з фазним ротором в одну ступінь в функції часу і динамічного гальмування в функції швидкості: а - силове коло; б- коло керування

На рис.16.14 представлено схему пуску асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу та динамічним гальмуванням у функції швидкості. Після ввімкнення автоматичних вимикачів QF1 і QF2 живлення подається на реле часу КТ, яке розмикає свій контакт у колі КМ1, запобігаючи передчасному спрацьовуванню. Для запуску двигуна натискається кнопка SB1 «Пуск», що активує контактор КМ3 — двигун починає розгін з уведеними резисторами в колі ротора. Одночасно розмикається контакт КМ3, який відключає реле часу від мережі. Після закінчення витримки часу

КТ замикає свій контакт, умикаючи КМ1, що шунтує резистори в роторному колі, і двигун переходить на природну механічну характеристику.

Для зупинки двигуна натискається кнопка SB2 «Стоп». У цей момент КМ3 знеструмлюється, розриваючи коло КМ1 і замикаючи коло КМ2, через яке обмотки статора підключаються до джерела постійного струму. Таким чином, двигун переходить у режим динамічного гальмування. У міру зменшення швидкості контакт реле контролю швидкості SR розмикається, відключаючи КМ2 та завершуючи гальмування. Після цього схема повертається до початкового стану, готового до нового пуску.

Типові вузли та схеми керування синхронним двигуном

Синхронні двигуни широко застосовуються у промисловості для приводу механізмів, які працюють зі сталою швидкістю — таких як компресори, насоси, вентилятори тощо. Завдяки розвитку напівпровідникової перетворювальної техніки з'явилася можливість створення керованих синхронних електроприводів із регульованими режимами роботи.

Попри певну конструктивну складність у порівнянні з асинхронними машинами, синхронні двигуни мають низку важливих переваг:

- здатність працювати з випереджальним коефіцієнтом потужності ($\cos\varphi > 1$), що дозволяє підвищити коефіцієнт потужності підприємства і зменшити потребу у компенсаційних пристроях;
- меншу чутливість до коливань напруги живлення;
- високу перевантажувальну здатність і стабільність швидкості обертання.
- Пуск синхронного двигуна може здійснюватися асинхронним способом — на повну або знижену напругу за допомогою реактора чи автотрансформатора.

На рис.16.15, а подано приклад схеми збудження синхронного двигуна з глухопідключеним збудником, яка відзначається простотою конструкції та може використовуватись у випадках, коли пускові струми не спричиняють надмірного падіння напруги в мережі. Така схема ефективна за умови, що статичний момент навантаження не перевищує $M_{\text{stat}} \leq 0,4 M_{\text{nom}}$.

Під час асинхронного пуску статор двигуна під'єднується безпосередньо до мережі, а двигун розганяється як асинхронний — до швидкості, близької до синхронної. У цей період обмотка збудження замикається на розрядний опір (рис. 16.15, б), щоб запобігти виникненню перенапруг. Коли ротор досягає швидкості, близької до синхронної, спрацьовує контактор КМ, який від'єднує обмотку збудження від розрядного опору та підключає її до якоря збудника, після чого двигун переходить у синхронний режим.

У сучасних системах часто застосовуються також тиристорні схеми збудження, які дають змогу точно регулювати момент подачі збудження залежно від типу пуску — «легкого» або «важкого». У першому випадку

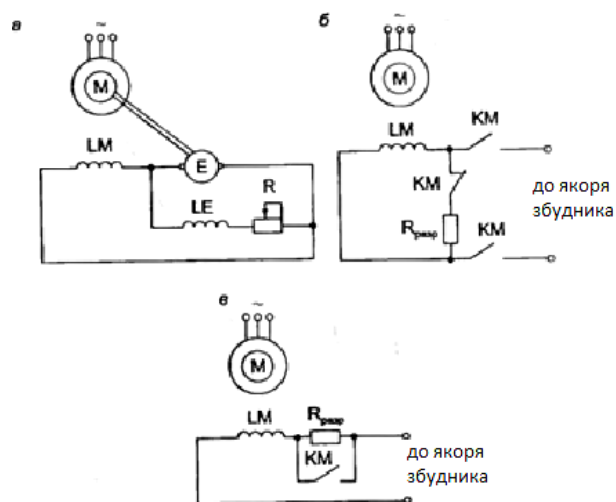


Рисунок 16.15 – Типові вузли схем збудження синхронного двигуна

Можливе підключення обмотки збудження двигуна до якоря збудника послідовно з розрядним опором (рис.16.15, в).

Процес автоматизації подачі збудження синхронного двигуна може здійснюватися двома способами — у функції швидкості або у функції струму.

На рис.16.16 показано схему, в якій збудження подається у функції швидкості обертання ротора. У ній використовується електромагнітне реле постійного струму КТ (іноді — реле часу з гільзою), котушка якого підключається через діод VD до розрядного опору $R_{\text{розр.}}$.

Після підключення обмотки статора до мережі в обмотці збудження індукуються ЕРС, а через котушку реле КТ проходить випрямлений пульсуючий струм, частота й амплітуда якого залежать від ковзання s .

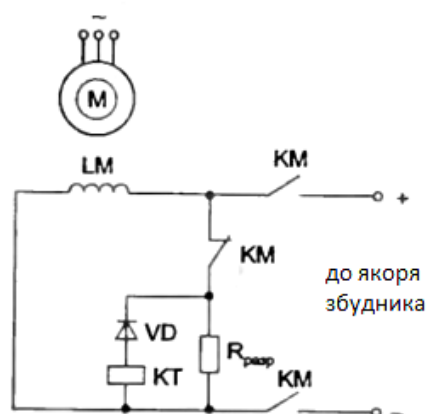


Рисунок 16.16 – Подача збудження на синхронний двигун в функції швидкості

При пуску, коли $s = 1$, струм має максимальне значення, а в міру розгону ротора інтервали між імпульсами збільшуються, і середнє значення магнітного потоку в реле зменшується.

Коли швидкість наближається до синхронної, магнітний потік у реле знижується до межі спрацьовування, реле КТ відпускає, замикаючи контакт у колі контактора КМ, який подає живлення на обмотку збудження. Таким чином, збудження автоматично вмикається саме в момент, коли ротор досягає синхронної швидкості.

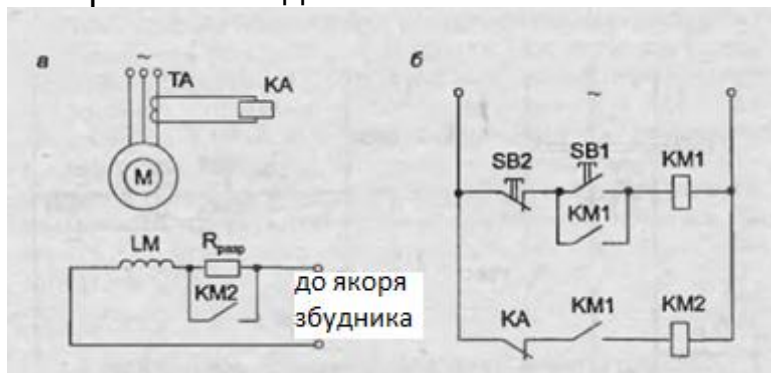


Рисунок 16.17 – Подача збудження на синхронний двигун в функції струму

На рис.16.17 показано схему подачі збудження синхронного двигуна у функції струму. Принцип її роботи ґрунтується на контролі пускового струму за допомогою реле струму КА.

Під час запуску двигуна через статор проходить великий пусковий струм, тому реле КА спрацьовує й розмикає свій контакт у колі контактора КМ2 (рис. 16.17, б), запобігаючи передчасному підключенню обмотки збудження. У процесі розгону двигуна струм зменшується; коли він досягає розрахункового мінімуму, реле КА відпускає, замикаючи контакт у колі КМ2. У результаті контактор КМ2 спрацьовує, замикає свій контакт у колі збудження та шунтує розрядний резистор $R_{розр}$, забезпечуючи подачу збудження.

Такий спосіб автоматизації дозволяє забезпечити плавний перехід від асинхронного пуску до синхронного режиму роботи, зберігаючи стабільність струму й моменту на валу двигуна.

Схема прямого пуску синхронного двигуна напругою до 1000 В

Асинхронний пуск синхронного двигуна здійснюється при включенні автоматичних вимикачів QF1, QF2 і спрацьовуванні контактора КМ3 (рис.16.18, а, б). При цьому реле форсировки КУ спрацьовує і замикає свої контакти, що призводить до спрацьовування контактора форсування КМ1. Контакт КМ1 розмикається, і в коло обмотки збудження вводиться резистор $R_{розр}$. Чи включаються червона і зелена сигнальні лампи, що вказує на приєднання двигуна до мережі, але збудження ще не подано.

При пусковому струмі спрацьовує реле максимального струму КА. Своїм замикаючим контактом воно подає живлення реле часу КТ1.

При зниженні напруги для збереження моменту двигуна застосовується форсування збудження при зниженні напруги реле форсування КУ відпадає і розмикає свій контакт, що призводить до відключення контактора форсування КМ1. При цьому контакт КМ1 в колі збудження двигуна замикається і шунтує резистор $R_{розр}$. Це призводить до збільшення струму збудження двигуна, а отже, і до збереження моменту двигуна. Зупиніть двигун, натиснувши на кнопку SB2 «Стоп» - і відключенням автоматичних вимикачів QF1 і QF2.

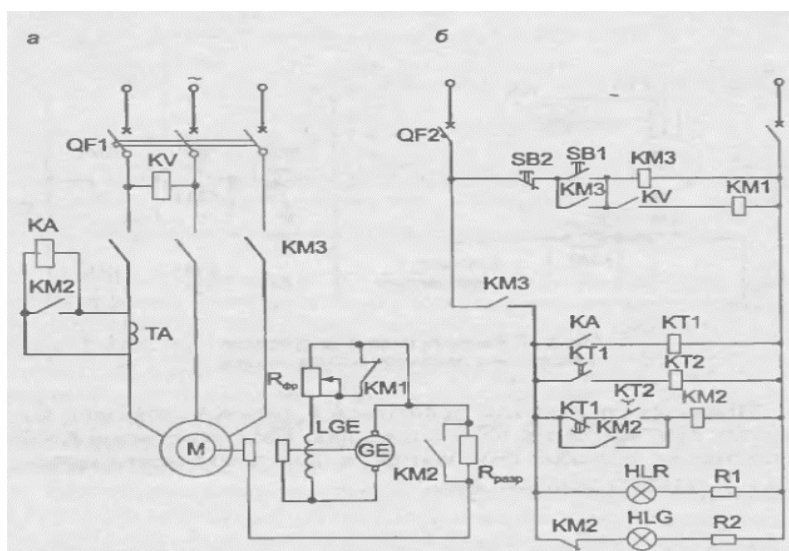


Рисунок 16.18 – Схема прямого пуска синхронного двигателя напругою до 1000 В

Висновки.

1. Релейно-контакторні системи автоматичного керування електроприводами змінного та постійного струму залишаються актуальними для промислових електроприводів з невисокими вимогами до точності регулювання, завдяки простоті, надійності та зручності експлуатації.

Типові вузли схем пуску двигунів постійного струму (у функції швидкості, струму та часу) забезпечують обмеження пускових струмів, зниження динамічних навантажень та підвищення ресурсу електричних машин.

Схеми динамічного гальмування та гальмування противмикання є ефективними засобами керованої зупинки електроприводів і широко застосовуються як у ДПС, так і в асинхронних двигунах.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором мають найпростішу структуру схем керування, а застосування нереверсивних і реверсивних магнітних пускатрів дозволяє реалізувати основні функції пуску, зупинки, реверсу та захисту.

Асинхронні двигуни з фазним ротором забезпечують м'який пуск і високий пусковий момент завдяки використанню пускових резисторів, керування якими може здійснюватися у функції часу або струму.

Синхронні двигуни потребують спеціальних вузлів автоматизації пуску та подачі збудження, що реалізуються у функції швидкості або струму та забезпечують надійний перехід від асинхронного пуску до синхронного режиму.

Блокування, захист і сигналізація є невід'ємними складовими схем автоматичного керування електроприводами, забезпечуючи безпечну експлуатацію обладнання та запобігання аварійним режимам.

Контрольні питання.

1. Які основні функції виконують релейно-контакторні схеми в системах автоматичного керування електроприводами?

З якою метою застосовуються пускові резистори в колі якоря двигуна постійного струму?

У чому полягає відмінність пуску двигуна у функції швидкості, струму та часу?

Які переваги та недоліки має пуск двигуна постійного струму у функції струму?

Поясніть принцип динамічного гальмування двигуна постійного струму.

У яких випадках застосовується гальмування противмиканням?

Які функції виконує нульовий захист у схемах керування асинхронними двигунами?

Як реалізується реверс асинхронного двигуна за допомогою магнітних пускатрів?

Для чого застосовуються пускові резистори в колі ротора асинхронного двигуна з фазним ротором?

Які способи автоматизації пуску асинхронних двигунів з фазним ротором використовуються на практиці?

Чому синхронні двигуни не мають власного пускового моменту?

Опишіть асинхронний пуск синхронного двигуна.

Як здійснюється автоматична подача збудження синхронного двигуна у функції швидкості?

У чому полягає принцип подачі збудження у функції струму?

Яку роль відіграють блокування та сигналізація в схемах автоматичного керування електроприводами?

Використана література.

1. Василега П. О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 290 с.
2. Вахоніна Л.В., Циганов О.М., Мардзявко В.А., Руденко А.Ю. Електричні машини та апарати : конспект лекцій. Миколаїв : Миколаївський національний аграрний університет, 2023. 367 с.
3. Електропривод виробничих машин і механізмів : навчальний посібник / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко, В. Я. Бунько, В. Ю. Рамш; за ред. О.Ю. Синявського. Київ : ФОП Ямчинський О.В., 2020. 444 с.

ТЕМА 17. ТИРИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Тиристорні перетворювачі в системах автоматичного керування електроприводами. Принципи керування реверсивним вентильним електроприводом. Динамічні властивості тиристорного перетворювача. Динамічні властивості машини постійного струму.

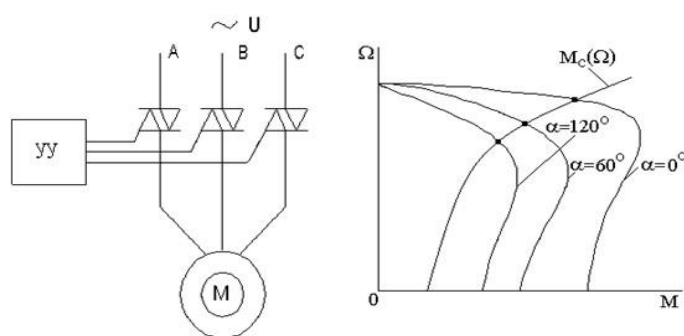
Регулювання швидкості за допомогою напівпровідниковими перетворювачами

Регулювання швидкості електродвигунів за допомогою напівпровідникових перетворювачів ґрунтується на використанні тиристорних або симісторних ключових елементів, що змінюють параметри напруги або частоти живлення. На рис.17.1, а подано схему асинхронного електропривода з тиристорним регулятором напруги (ТРН), установленим у колі статора.

Пара симісторів V1–V3 утворює трифазний двопівперіодний регулятор змінної напруги, керування яким здійснюється шляхом зміни кута керування α .

На рис.17.1, б показано відповідні механічні характеристики двигуна для різних значень кута α . Зі збільшенням цього кута напруга, що подається на статор, зменшується, унаслідок чого робоча частина характеристики стає більш пологою, а перевантажувальна здатність двигуна — нижчою.

Такі схеми доцільно застосовувати для механізмів вентиляторного типу, у яких момент опору пропорційний квадрату швидкості обертання. Незважаючи на обмежений діапазон регулювання, ТРН забезпечує плавну зміну швидкості й просту конструкцію системи керування.



а - варіант принципової електричної схеми; б - механічні характеристики.

Рисунок 17.1 – Асинхронний електропривод з ТРН в колі статора :

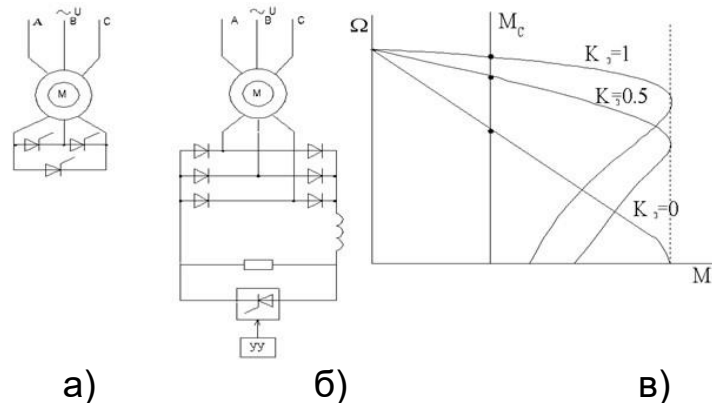
З тиристорним регулятором змінної напруги (ТРН) в колі статора асинхронного електродвигуна

На рис. 17.2 наведено варіанти схем асинхронного електропривода з тиристорними ключовими елементами в колі ротора. Регулювання швидкості тут досягається шляхом зміни активного опору роторного кола за допомогою тиристорних регуляторів.

У схемі (рис. 17.2, а) використовується природна комутація, коли тиристор періодично переходить у вимкнений стан унаслідок зміни полярності струму. У варіанті (рис. 17.2, б) застосовується штучна комутація, що забезпечує примусове вимкнення тиристора незалежно від фази струму. У цьому випадку дросель L використовується для згладжування пульсацій струму в роторному колі.

На рис. 17.2, в показано механічні характеристики двигуна при різних коефіцієнтах заповнення імпульсів. Зі зменшенням коефіцієнта заповнення характеристики стають більш м'якими, однак двигун зберігає здатність розвивати необхідний момент.

Регулювання швидкості в таких схемах супроводжується втратами енергії у резисторах, але воно забезпечує плавність зміни частоти обертання та добру стійкість у перехідних режимах, що особливо важливо для приводів із великим моментом інерції.



а - з природною комутацією ; б - з штучною комутацією ; в - механічні характеристики

Рисунок 17.2 – Асинхронний електропривод з тиристорними ключовими елементами в колі ротора

З частотним регулюванням асинхронних і синхронних електродвигунів

Частотне регулювання швидкості асинхронних і синхронних електродвигунів є найефективнішим способом зміни частоти обертання, оскільки забезпечує високий коефіцієнт корисної дії та широкий діапазон регулювання. Принцип дії таких систем полягає у тому, що статор двигуна підключається до мережі через перетворювач частоти (ПЧ), який змінює мережеву частоту f_c на регульовану частоту f_m .

На рис. 17.3 показано загальну схему підключення асинхронного двигуна через ПЧ. Залежно від конструкції розрізняють три типи частотних перетворювачів:

- безпосередні перетворювачі, у яких відсутня ланка постійного струму;
- перетворювачі з явно вираженою ланкою постійного струму, що складаються з керованого випрямляча й автономного інвертора;
- перетворювачі з неявно вираженою ланкою постійного струму, у яких частина елементів одночасно виконує функції випрямлення й інвертування.

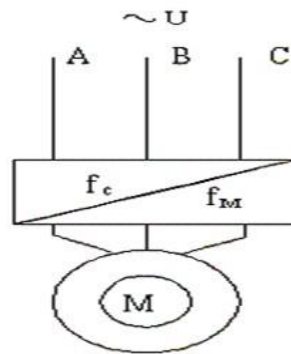


Рисунок 17.3 – Підключення асинхронного електродвигуна через перетворювач частоти.

У безпосередніх перетворювачах регулювання частоти здійснюється вниз від частоти мережі, а вихідна напруга має дискретну форму (рис. 17.4, а).

У перетворювачах з проміжною ланкою постійного струму напруга, що живить двигун, формується інвертором із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) (рис. 17.4, б), що дозволяє отримати практично синусоїдальну форму струму і значно зменшити вміст гармонік.

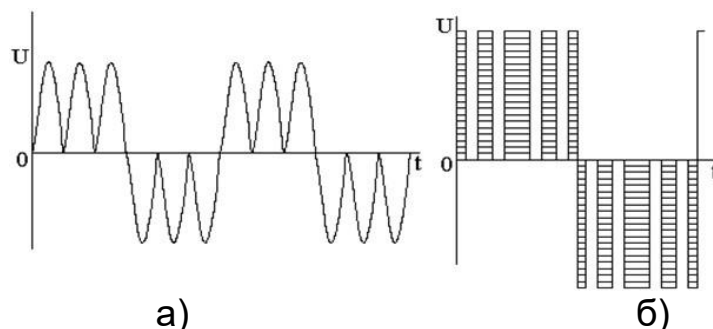


Рисунок 17.4 – Форма напруги на одній з фаз статора : а - при живленні от непосредственного ПЧ; б - при живленні від ПЧ з проміжною ланкою постійного струму з широтно-імпульсною модуляцією.

Для забезпечення стабільної роботи електродвигуна при частотному регулюванні необхідно дотримуватись певного співвідношення між напругою живлення U_1 і частотою f_1 . Це дозволяє підтримувати сталим магнітний потік у сталі машини, а отже — і обертовий момент.

При постійному моменті навантаження виконується співвідношення:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} f$$

тобто напруга живлення має змінюватися пропорційно частоті.

При постійному навантаженні за потужністю напруга змінюється пропорційно квадратному кореню з частоти:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$$

а при вентиляторному типі навантаження, коли момент опору пропорційний квадрату швидкості, напруга повинна змінюватися пропорційно квадрату частоти:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$$

Таким чином, регулювання напруги узгоджується з характером навантаження, що дозволяє забезпечити оптимальний режим роботи двигуна в усьому діапазоні частот.

В інверторах з неявно вираженою ланкою постійного струму ряд силових елементів схеми поєднує функції випрямлення і інвертування напруги.

З вентильним перетворювачем в якірному колі електродвигуна постійного струму

- Вентильні електроприводи, що поєднують вентильний перетворювач і двигун постійного струму, широко застосовуються у промисловості завдяки можливості плавного, точного й економічного регулювання кутової швидкості в широкому діапазоні. У таких системах зміна швидкості здійснюється за рахунок регулювання напруги живлення якоря, яке формується випрямлячем.

Найпоширенішими є мостові схеми випрямлення (одно- і трифазні). Для спрощення конструкції та зниження вартості в нереверсивних системах часто застосовуються напівкеровані мости, у яких частину тиристорів замінено діодами.

- У реверсивних електроприводах зміна напрямку обертання здійснюється трьома способами:

- зміною напрямку струму в колі якоря за допомогою механічного або електронного реверсора — використовується у випадках, коли допустима коротка пауза (до 0,1–0,2 с) між реверсами;

- застосуванням двох вентильних груп з протилежною полярністю вихідної напруги (рис. 17.5), що забезпечує швидкодію і точність, необхідні для динамічних систем;

- зміною напрямку струму у колі збудження, що є простішим і дешевшим варіантом, проте має меншу швидкодію через значну електромагнітну постійну часу обмотки збудження (0,5–2,5 с).

Реверсивні вентиляльні перетворювачі можуть бути виконані у двох варіантах — однокомплектні (з контактним реверсом або на симетричних тиристорах) і двокомплектні (рис. 17.5).

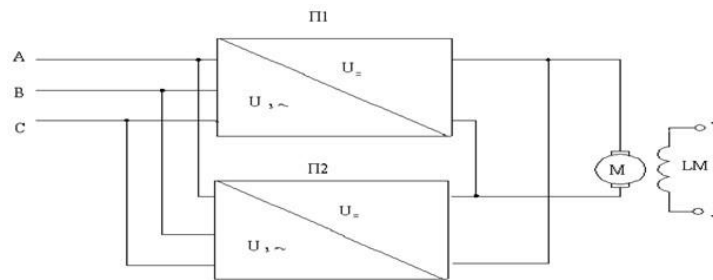


Рисунок 17.5 – Підключення двигуна постійного струму до двокомплектного випрямляча

У двокомплектних системах використовуються дві вентиляльні групи, які можуть працювати у режимах роздільного або спільного керування.

При роздільному керуванні імпульси відкриття подаються лише на вентиля однієї з груп — випрямної або інверторної. Перемикання між ними виконується в безструмову паузу, що фіксується датчиком струму, завдяки чому забезпечується плавний і безпечний перехід між напрямками обертання двигуна. У малопотужних приводах, з метою здешевлення, обидві групи можуть керуватися спільним імпульсно-фазовим пристроєм, який перемикає імпульси між групами за допомогою безконтактного комутатора.

При спільному керуванні імпульси подаються одночасно на обидві групи вентилів: одна з них працює у випрямному режимі, інша — в інверторному. У цьому випадку між групами виникає зрівняльний струм, який замикається всередині кола вентилів, оминаючи коло якоря двигуна. Для обмеження цього струму до безпечного рівня (приблизно $0,1 I_{\text{ном}}$) у схемі використовується реактор (дросель) із відповідним індуктивним опором.

У сучасних реверсивних системах перевага надається однокомплектним перетворювачам із контактним реверсом або двокомплектним зі схемою роздільного керування, які забезпечують високу швидкодію, стабільність і безпечну експлуатацію. Спільне керування застосовується переважно у спеціалізованих приводах, що працюють у зоні малих навантажень із частими реверсами струму в колі якоря.

Висновки.

1. Тиристорні перетворювачі є базовим елементом систем автоматичного керування електроприводами, оскільки забезпечують плавне, економічне та кероване регулювання електромеханічних параметрів двигунів.
2. Регулювання швидкості асинхронних електродвигунів за допомогою тиристорних регуляторів напруги в колі статора є конструктивно простим,

однак обмеженим за діапазоном і доцільним переважно для механізмів вентиляторного типу.

3. Використання тиристорних ключових елементів у роторному колі асинхронних двигунів з фазним ротором дозволяє реалізувати плавний пуск і регулювання швидкості при великих пускових моментах, хоча супроводжується додатковими енергетичними втратами.
4. Частотне регулювання електроприводів із застосуванням перетворювачів частоти є найбільш ефективним методом керування швидкістю, що забезпечує високий ККД, широкий діапазон регулювання та покращені динамічні властивості системи.
5. Узгодження напруги живлення з частотою відповідно до характеру навантаження (постійний момент, постійна потужність, вентиляторне навантаження) є необхідною умовою стабільної та надійної роботи електродвигуна.
6. Вентильні електроприводи з двигунами постійного струму забезпечують високу точність регулювання швидкості та моменту, що обумовлює їх широке застосування у реверсивних і динамічних системах.
7. Реверсивні вентильні перетворювачі можуть реалізовувати зміну напрямку обертання різними способами, серед яких найбільш досконалими є двокомплектні схеми з роздільним керуванням, що забезпечують безпеку, швидкодію та стабільність роботи.
8. Динамічні властивості тиристорного перетворювача та машини постійного струму істотно впливають на якість перехідних процесів і повинні враховуватися при проєктуванні систем автоматичного керування електроприводами.

Контрольні питання.

1. Яке призначення тиристорних перетворювачів у системах автоматичного керування електроприводами?
2. У чому полягає принцип регулювання швидкості асинхронного двигуна за допомогою тиристорного регулятора напруги?
3. Як впливає зміна кута керування тиристорів на механічні характеристики електродвигуна?
4. Для яких типів механізмів доцільно застосовувати тиристорні регулятори напруги в колі статора?
5. У чому полягає відмінність між природною та штучною комутацією тиристорів?
6. Які переваги та недоліки регулювання швидкості асинхронного двигуна через роторне коло?
7. Назвіть основні типи перетворювачів частоти та охарактеризуйте їх.
8. Яке співвідношення між напругою і частотою необхідно підтримувати при частотному регулюванні?
9. Чим відрізняється регулювання для навантажень з постійним моментом і вентиляторних механізмів?

10. Які схеми випрямлячів застосовуються у вентильних електроприводах постійного струму?
11. Якими способами реалізується реверс електропривода постійного струму?
12. У чому полягає різниця між однокомплектними та двокомплектними вентильними перетворювачами?
13. Що таке режим роздільного керування у двокомплектному реверсивному перетворювачі?
14. Чому при спільному керуванні необхідно обмежувати зрівняльний струм?
15. Які фактори визначають динамічні властивості тиристорного електропривода?

Використана література.

1. Васи́лега П. О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 290 с.
2. Вахоніна Л.В., Циганов О.М., Мардзявко В.А., Руденко А.Ю. Електричні машини та апарати : конспект лекцій. Миколаїв : Миколаївський національний аграрний університет, 2023. 367 с.
3. Електропривод виробничих машин і механізмів : навчальний посібник / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко, В. Я. Бунько, В. Ю. Рамш; за ред. О.Ю. Синявського. Київ : ФОП Ямчинський О.В., 2020. 444 с.
4. Конспект лекцій з дисципліни «Системи керування електроприводами» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / уклад. В. Б. Нізімов. Кам'янське : ДДТУ, 2019. 124 с.

ТЕМА 18. РІВНЯННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ. СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Координатні перетворення. Перетворення рівнянь узагальненої електричної машини. Фазні перетворення. Рівняння зв'язку трьох- та двофазних машин. Модель асинхронного двигуна на базі рівнянь узагальненої електричної машини. Системи управління асинхронного електроприводу. Способи частотного керування. Скалярне регулювання. Стабілізація швидкості та моменту у системах скалярного управління. Векторне керування.

Узагальнена електрична машина та необхідність координатних перетворень

Поняття узагальненої електричної машини

Узагальнена електрична машина (УЕМ) — це математична модель, яка дозволяє єдиним способом описувати електричні машини змінного по аналогії з машинами постійного струму шляхом переходу до відповідної системи координат.

Використання УЕМ дає змогу:

- уніфікувати рівняння асинхронних, синхронних;
- спростити аналіз електромагнітних процесів;
- створити основу для сучасних алгоритмів керування (векторного).

Основна ідея полягає в тому, що реальні трифазні змінні величини (струми, напруги, потокозчеплення) замінюються еквівалентними векторами у спеціально вибраній системі координат.

Причини застосування координатних перетворень

Без перетворень рівняння електричних машин:

- є нелінійними;
- містять синусоїдальні залежності;
- ускладнюють синтез систем керування.

Координатні перетворення дозволяють:

- перейти від змінних величин до квазіпостійних;
- розділити канали керування потоком і моментом;
- реалізувати принципи, аналогічні керуванню машиною постійного струму.

Координатні та фазні перетворення в теорії електричних машин

Фазні перетворення ($abc \rightarrow \alpha\beta$)

Фазні перетворення використовуються для переходу:

- від трифазної системи (a, b, c)
- до двохфазної нерухомої системи координат (α, β).

Це зменшує кількість рівнянь без втрати інформації про електромагнітні процеси.

Умова симетрії трифазної системи дозволяє відмовитися від третьої координати.

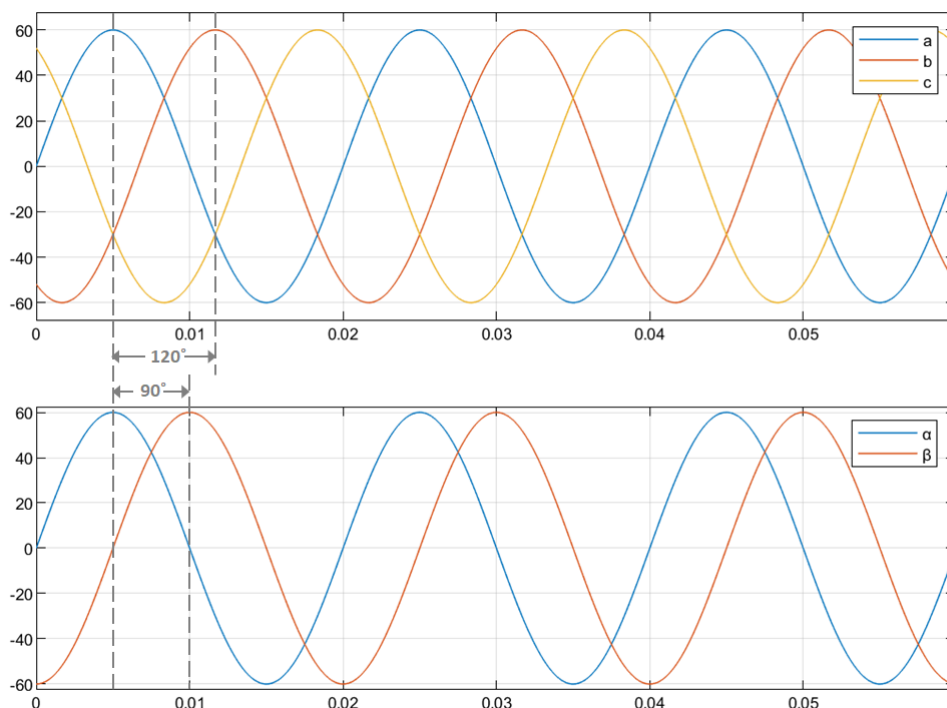


Рисунок 18.1 Перетворення $abc \rightarrow \alpha\beta$

Перетворення Кларка

Перетворення Кларка переводить трифазну систему у двовимірний вектор у нерухомій системі координат.

Фізично це означає заміну трьох синусоїдальних струмів одним обертним вектором струму.

Перетворення Парка

Перетворення Парка виконує перехід:

- з нерухомої системи ($\alpha\beta$)
- у обертovu систему координат ($d-q$ (uv)), пов'язану з полем машини. У цій системі:
- струм по осі $d(u)$ відповідає за магнітний потік;
- струм по осі $q(v)$ формує електромагнітний момент.

Рівняння зв'язку трифазних і двофазних машин

Фізичний зміст еквівалентності

Будь-яка симетрична трифазна машина може бути представлена як еквівалентна двофазна машина, що:

- має ті самі енергетичні показники;
- відтворює реальні електромагнітні процеси.

Це дозволяє:

- зменшити порядок математичної моделі;
- отримати наочні векторні діаграми.

Зв'язок між фазними та координатними величинами

Між фазними струмами і координатними складовими існує однозначний математичний зв'язок, який забезпечує:

- збереження миттєвої потужності;

- коректність розрахунку моменту та потокозчеплення.

Модель асинхронного двигуна на базі рівнянь узагальненої електричної машини

Структура математичної моделі

Асинхронний двигун у координатах $d-q$ описується:

- рівняннями електричних кіл статора і ротора;
- рівняннями потокозчеплення;
- рівнянням електромагнітного моменту;
- механічним рівнянням руху.

Така модель є основою:

- комп'ютерного моделювання;
- синтезу систем керування;
- реалізації алгоритмів у частотних перетворювачах.

Переваги dq -моделі

Модель у координатах $d-q$ дозволяє:

- розділити керування моментом і потоком;
- реалізувати швидкодіючі системи регулювання;
- підвищити точність стабілізації швидкості.

Системи керування асинхронним електроприводом

Загальна класифікація

Системи керування асинхронним електроприводом поділяються на:

- скалярні;
- векторні (полеорієнтовані);
- системи з прямим керуванням моментом (DTC).

Частотне керування. Скалярне регулювання

Принцип частотного керування

Частотне керування базується на зміні:

- частоти живлення;
- амплітуди напруги статора.

Основна мета — регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна.

Закон $U/f = \text{const}$

При скалярному керуванні підтримується сталим співвідношення:

$$\frac{U}{f} = \text{const}$$

що забезпечує приблизну сталість магнітного потоку.

Обмеження скалярного керування

Недоліки:

- відсутність прямого контролю моменту;
- погіршення динаміки при навантаженнях;
- обмежена точність стабілізації швидкості.

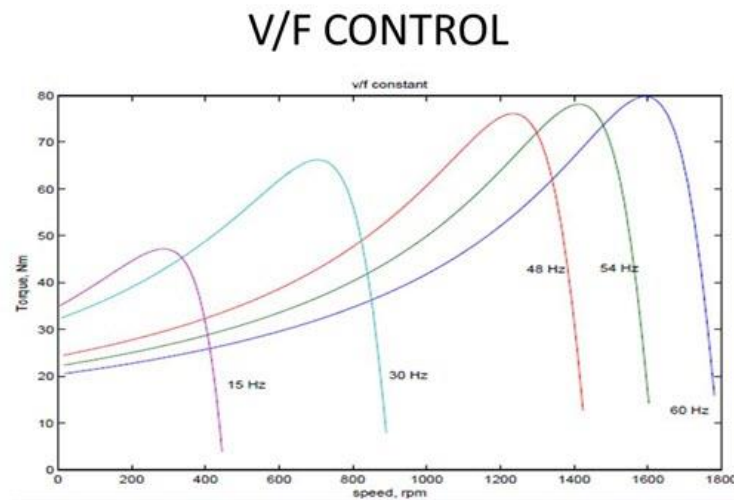


Рисунок 18.2 Механічні характеристики при скалярному керуванні

Стабілізація швидкості та моменту при скалярному керуванні

Для покращення характеристик застосовуються:

- компенсація падіння напруги на активному опорі статора;
- замкнені контури швидкості;
- використання ПІ-регуляторів.

Однак навіть з компенсаціями скалярне керування не забезпечує повної незалежності керування моментом і потоком, що обмежує його застосування у високодинамічних приводах.

Векторне керування асинхронним електроприводом

Принцип векторного керування

Векторне керування базується на:

- використанні dq-перетворень;
- орієнтації системи координат по вектору магнітного потоку ротора.

У результаті асинхронний двигун за принципом керування наближається до двигуна постійного струму.

Переваги векторного керування

- незалежне керування моментом і потоком;
- висока точність стабілізації швидкості;
- добрі динамічні властивості;
- можливість роботи при малих швидкостях і високих моментах.

Узагальнена електрична машина є фундаментом сучасної теорії електропривода.

- Координатні перетворення дозволяють перейти від складних змінних процесів до керованих векторних величин.
- Скалярне керування є простим і надійним, але має обмежені динамічні можливості.
- Векторне керування забезпечує високоточне регулювання і є базою сучасних частотних електроприводів.

Висновки.

1. Узагальнена електрична машина є універсальною теоретичною моделлю, що дозволяє єдиним підходом описувати електричні машини змінного та постійного струму і слугує основою сучасної теорії електропривода.

Застосування координатних і фазних перетворень (Кларка, Парка) дає змогу перейти від трифазних змінних величин до двофазних векторних координат, що суттєво спрощує аналіз електромагнітних процесів та синтез систем керування.

Перехід до двофазних еквівалентних моделей забезпечує зменшення кількості рівнянь без втрати фізичного змісту процесів у машині та дозволяє наочно інтерпретувати взаємозв'язок між струмами, потокозчепленням і моментом.

Математична модель асинхронного двигуна, побудована на основі рівнянь узагальненої електричної машини в координатах $d-q$, є базою для аналізу динамічних режимів, комп'ютерного моделювання та реалізації сучасних алгоритмів керування.

Системи керування асинхронним електроприводом поділяються на скалярні та векторні, які істотно відрізняються за складністю, точністю регулювання та динамічними властивостями.

Скалярне керування, засноване на законі $U/f = \text{const}$, характеризується простотою реалізації та надійністю, однак має обмежені можливості стабілізації моменту і швидкості, особливо при змінних навантаженнях.

Векторне керування забезпечує незалежне регулювання електромагнітного моменту та магнітного потоку асинхронного двигуна, що значно покращує динамічні та статичні характеристики електропривода.

Засвоєння принципів узагальненої електричної машини та сучасних методів керування асинхронним електроприводом є необхідною передумовою для подальшого вивчення частотних перетворювачів і автоматизованих систем керування електромеханічними об'єктами.

Контрольні питання.

1. Що називають узагальненою електричною машиною та з якою метою вона застосовується?
2. Які основні переваги використання координатних перетворень у теорії електричних машин?
3. У чому полягає фізичний зміст фазних перетворень трифазної системи?
4. Для чого застосовується перетворення Кларка і які величини воно формує?
5. У чому полягає суть перетворення Парка?

6. Який фізичний зміст координат d та q у векторній моделі електричної машини?
7. Чому трифазну електричну машину можна подати у вигляді двофазної еквівалентної моделі?
8. Які основні рівняння входять до математичної моделі асинхронного двигуна?
9. У чому полягають переваги моделі асинхронного двигуна в координатах d – q ?
10. Які основні типи систем керування асинхронним електроприводом застосовуються на практиці?
11. У чому полягає принцип частотного керування асинхронним двигуном?
12. Які основні недоліки скалярного керування асинхронним електроприводом?
13. Якими способами можна покращити стабілізацію швидкості при скалярному керуванні?
14. У чому полягає принцип векторного керування асинхронним двигуном?
15. Які переваги має векторне керування порівняно зі скалярним?
16. Чому асинхронний двигун при векторному керуванні за принципом роботи наближається до двигуна постійного струму?
17. У яких випадках доцільно застосовувати скалярне керування, а у яких — векторне?

Використана література.

1. Василега П. О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 290 с.
2. Вахоніна Л.В., Циганов О.М., Мардзявко В.А., Руденко А.Ю. Електричні машини та апарати : конспект лекцій. Миколаїв : Миколаївський національний аграрний університет, 2023. 367 с.
3. Електропривод виробничих машин і механізмів : навчальний посібник / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко, В. Я. Бунько, В. Ю. Рамш; за ред. О.Ю. Синявського. Київ : ФОП Ямчинський О.В., 2020. 444 с.

Навчально-методичне видання

Шрамко Юрій Юрійович

«Електричні машини та основи електроприводу»
курс лекцій з дисципліни

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції